

BBSR-
Online-Publikation
82/2024

Zukunft von Bauweisen mit höheren Dichten

von

Dr. Roland Göttig
Mai-Khanh Talke
Dr. Carole Binsfeld
Nadine Engel
Prof. Dr. Klaus Sedlbauer
Juan Romero Amaya
Prof. Thomas Auer

Zukunft von Bauweisen mit höheren Dichten

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.40

Projektlaufzeit: 01.2022 bis 12.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Dr.-Ing. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Technische Universität München (TUM)
Lehrstuhl für Bauphysik
Dr. Roland Göttig
goettig@tum.de

Mai-Khanh Talke, M. Sc.
Dr. Carole Binsfeld
Nadine Engel, M. Sc.
Prof. Dr. Klaus Sedlbauer

Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen
Juan Romero Amaya, M. Sc.

Prof. Thomas Auer
thomas.auer@tum.de

Redaktion

Technische Universität München (TUM)
Lehrstuhl für Bauphysik
Dr. Roland Göttig

Stand

März 2024

Gestaltung

Technische Universität München (TUM)
Lehrstuhl für Bauphysik
Dr. Roland Göttig

Bildnachweis

Titelbild: Dr. Roland Göttig
Alle weiteren Abbildungen: Eigene Darstellungen bzw. Quellen in der Bildunterschrift angegeben

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Göttig, Roland; Talke, Mai-Khanh; Binsfeld, Carole; Engel, Nadine; Sedlbauer, Klaus; Amaya, Juan Romero; Auer, Thomas, 2024: Zukunft von Bauweisen mit höheren Dichten. BBSR-Online-Publikation 82/2024, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
Abstract in English	8
1 Einführung	9
2 Klimatische Randbedingungen	11
Klimadaten	12
Klimaanalyse	13
Fazit bezüglich anwendbarer klimatischer Randbedingungen	23
3 Auswahl der Modellgebäude	24
4 Randbedingungen und Anforderungen	26
Allgemeine Randbedingungen	26
Interne Wärmequellen	27
Luftwechsel und Fensterlüftung	28
Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz	29
Sommerlicher Komfort	30
Anforderungen an den winterlichen Wärmeschutz	32
5 Bauteilaufbauten	33
6 Variantenmatrix	36
Basisvarianten	38
Finale Variantenmatrix	38
7 Grundlagen der thermischen Simulation	40
8 Auswertung der Ergebnisse	41
Winterlicher Wärmeschutz	41
Sommerlicher Wärmeschutz	52
Auswahl repräsentativer Varianten	63
Energiebedarf und Sektorkopplung	67
Tragfähigkeit, Schallschutz und weitere Parameter	68
Ökobilanz	71
9 Demonstrator	73
10 Fazit und Ausblick	75
Bewertung der Methodik	75
Validität der Ergebnisse	75
Hinweise für möglich normative Vorgaben und Vereinfachungen	76
Zielgruppenorientierte Bewertung und weitere Aspekte	77
Ausblick Forschungsmethodik	78

11 Mitwirkende	79
Kurzbiographien	80
12 Verzeichnisse	82
Literaturverzeichnis	82
Abbildungsverzeichnis	87
Tabellenverzeichnis	90
13 Anlagen	91

Kurzfassung

In den letzten Dekaden hat sich die Art und Weise der Baukonstruktion und dabei in besonderem Maß die Art der Konstruktion der Gebäudehülle stark verändert. Während bis zu den ersten Ölpreiskrisen Wärmeschutz und Feuchteschutz im Sinne von Schadensfreiheit normativ geregelt wurden, wurden danach zunehmend Anforderungen hinsichtlich immer strengerer, energetischer Vorgaben festgelegt. Dies führte dazu, dass die zugehörigen Vorschriften nur durch Außenwandkonstruktionen mit niedrigeren U Werten (Wärmedurchgangskoeffizienten) erreicht werden konnten. Infolgedessen gab es bei massiven Wandkonstruktionen eine Entwicklung, bei der entweder monolithische Bauweisen so verändert wurden, dass die Außenwände niedrigere Wärmeleitfähigkeiten und damit niedrigere Rohdichten erhielten oder, dass vor Außenwände mit höheren Rohdichten zusätzliche Dämmschichten angebracht wurden. Beide Maßnahmen erlauben es, heutzutage sehr effiziente Gebäudehüllen herzustellen. Die Verwendung von Bauweisen mit niedrigeren Rohdichten der Außenwände führt aber auch dazu, dass bei Überhitzungen in heißen Sommern weniger aktivierbare Speichermasse zur Verfügung steht und dass andere Materialeigenschaften, wie die Tragfähigkeit oder der Schallschutz vermindert werden.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird exemplarisch für den Geschosswohnungsbau und Bürogebäude ähnlicher Grundstruktur gezeigt, welche Auswirkungen dadurch unter zukünftigen klimatischen Bedingungen zu erwarten sind. Es werden typische moderne massive Außenwandkonstruktionen in verschiedenen Rohdichteklassen von 600 kg/m^3 bis 1800 kg/m^3 mit modernen Leichtbaukonstruktionen in Holzrahmenbauweise verglichen.

Es zeigt sich, dass beim winterlichen Wärmeschutz aktivierbare Speichermassen keinen signifikanten Einfluss haben, während bei zukünftig wärmeren Sommern dies immer wichtiger wird, um Überhitzungen zu minimieren. Gleichzeitig kann empfohlen werden, den Fensterflächenanteil möglichst niedrig zu halten, so dass eine ausreichende Belichtung durch Tageslicht noch gewährleistet bleibt und dass robuste Verschattungseinrichtungen im Geschosswohnungsbau selbst für heutige Planungen mit bedacht werden sollten.

Mittels eines Demonstrators, der alle Ergebnisse aus etwa 17.000 untersuchten und mit dynamischen Simulationen überprüften Varianten enthält, können die ermittelten Kenngrößen für die zu erwartenden Überhitzungen schnell visualisiert werden. Der Demonstrator kann heruntergeladen und unter Nennung der Autorenschaft (siehe oben) sowie des Innovationsprogramms ZukunftBau des BBSR frei genutzt werden.

Abstract in English

Over the last few decades, the way in which buildings are constructed and, in particular, the way in which the building envelope is designed has changed considerably. Up to the first oil price crises thermal insulation and moisture protection were regulated by standards in the sense of damage-free construction. Then, requirements were tightened up with regard to stricter energy specifications. This meant that the associated regulations could only be met by external wall constructions with lower U values (heat transfer coefficients). As a result, solid wall constructions were developed in which either monolithic construction methods were modified so that the external walls had lower thermal conductivities and therefore lower gross densities, or additional insulation layers were added in front of external walls with higher gross densities. Both measures made it possible to produce very efficient building envelopes today. However, the use of construction methods with lower gross densities of the outer walls also means that less activatable storage mass is available in the event of overheating in hot summers and that other material properties, such as load-bearing capacity or sound insulation, are reduced.

As part of this research project, effects that can be expected under future climatic conditions will be shown for multi-storey residential buildings and office buildings with a similar structure. Typical modern solid external wall constructions in various bulk density classes from 600 kg/m^3 to 1800 kg/m^3 are compared with modern lightweight timber frame constructions.

It is shown that storage masses that can be activated have no significant influence on energy efficiency in winter, whereas this will become increasingly important in future warmer summers in order to minimize overheating. At the same time, it can be recommended that the proportion of window area should be kept as low as possible so that adequate supply with daylight is still guaranteed and that robust shading devices in multi-storey residential buildings should be considered even for today's planning.

Using a demonstrator, which contains all the results from around 17,000 variants examined and checked with dynamic simulations, the parameters determined for the expected overheating can be quickly visualized. The demonstrator can be downloaded and used freely, provided the authorship and the funding scheme "ZukunftBau of the BBSR, Germany" is acknowledged (see above).

Einführung

Um die Auswirkungen des Klimawandels zu minimieren, wurden in Deutschland und vielen anderen Ländern große Anstrengungen unternommen, die Energieeffizienz von Gebäuden entscheidend zu verbessern (z. B. Minimierung der Transmissionswärmeverluste und der Lüftungswärmeverluste sowie effiziente Anlagentechnik) und die Nutzung erneuerbarer Energien auszubauen. Parallel entsteht die Notwendigkeit, das Lastmanagement der Energieversorgung zu optimieren, wobei große Speicher von Vorteil sind. Gebäude mit höheren Rohdichten und je nach Baustoff höheren Wärmeeindringkoeffizienten bieten genau dies bei gleichzeitig günstigen Eigenschaften in Bezug auf Tragfähigkeit und Schallschutz. Studien zur gesamten Speicherfähigkeit, des überwiegend aus massiven Gebäuden bestehenden Gebäudebestandes, zeigen dieses Potential (Lüking und Hauser, 2011; Hausladen et al., 2014; Kornadt et al., 2019). Damit existieren bereits wesentliche Grundlagen und Ideen zur Klassifizierung und Nutzung der Speicherfähigkeit verschiedener Bauweisen auch für unterschiedliche Nutzungen (Wohnen, Büros, Bildung, Gewerbe). Wichtig ist hierbei, inwiefern Konstruktionen gewählt werden, die es erlauben, dass die stofflich vorhandene Wärmespeicherfähigkeit auch nutzbar ist. So können beispielsweise aus akustischen Gründen Dämmstoffe verwendet werden, die die Speichermassen vom Innenraum thermisch entkoppeln. Daher werden geeignete Konstruktionen untersucht, mit denen mehrere Anforderungen wie eine gute Raumakustik und thermisch aktivierbare Speichermassen umsetzbar sind.

Die jahrelange Fokussierung auf die Energieeinsparung jedoch nicht auf die Energiespeicherung hatte zur Folge, dass heutzutage übliche Konstruktionen mit geringen Rohdichten oder als schwere Bauweisen mit zusätzlicher Außendämmung ausgeführt werden. Dies hatte auch Auswirkungen auf Tragfähigkeit, Schallschutz und häufig auf die aktivierbare thermische Masse. Zudem wurden Composite aus verschiedenen Materialien entwickelt, bei denen im Fall von Rück- und Umbaumaßnahmen eine stoffliche Trennung zumindest schwierig ist. Reine Stahlbetonkonstruktionen (oder Mauerwerkskonstruktionen) mit Außendämmung weisen ökobilanzielle Nachteile auf. Entscheidend wird bei den Überlegungen zu geeigneten zukunftssicheren Bauweisen sein, inwieweit winterlicher und sommerlicher Wärmeschutz bei verändertem Nutzerverhalten (zunehmend Homeoffice, Workspace-Sharing) und veränderten äußeren Randbedingungen gelingen kann. Auf der Basis vorangegangener Studien, wie z. B. zum Wärmespeicherfähigkeitsindex (Kornadt et al., 2019), müssen hierzu aber noch für die in nächster Zukunft höchstwahrscheinlich eher extremeren und tendenziell wärmeren Klimata Antworten gefunden werden. Hierbei müssen zusätzlich lokale Besonderheiten wie der Hitzeinseleffekt in Städten berücksichtigt werden.

Es gilt, zu untersuchen, ob raumnahe Speichermassen mit Bauteilen, die tendenziell höhere Rohdichten aufweisen, in Zukunft im Sommer Überhitzungen minimieren und im Winter als Puffer dienen können. Diese Untersuchung fokussiert auf Grund der zahlenmäßigen Dominanz auf den Geschosßwohnungsbau, genauer auf Mehrfamilienhäuser (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2021), wesentliche Ergebnisse können jedoch auf einfache Büronutzungen oder Mischnutzungen übertragen werden. Um die Potentiale von Bauweisen mit höheren Rohdichten zu verstehen und im Folgenden ausschöpfen zu können, müssen auch auf der Basis existierender Forschung (u. a. Wärmespeicherfähigkeitsindex (Kornadt et al., 2019)) neue Bewertungs- und Auswahlverfahren entwickelt werden.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben werden Bauweisen mit höheren Rohdichten mittels verschiedener Zukunftsszenarien zunächst hinsichtlich ihrer thermischen Eigenschaften bewertet. Hierfür wird ein Vergleich von schweren, mittelschweren und leichten Bauweisen durchgeführt. Für die Untersuchung der thermischen Eigenschaften bezüglich des sommerlichen Wärmeschutzes werden für die äußeren Randbedingungen geeignete Zukunftsszenarien angesetzt (z. B. Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC). Des Weiteren existieren realistische aktuelle Lastprofile sowie prognostizierte Lastprofile für zukünftige Klimaentwicklungen in Abhängigkeit zu erwartender oder gewünschter Anteile an regenerativer (fluktuierender) Energie (Auer et al., 2017). Mittels dynamischer Simulationen werden sinnvolle Kombinationen hieraus untersucht und für drei verschiedene, zuvor definierte Standorte in Deutschland (warm, mittel, kühl) mit verschiedenen klimatischen Zukunftsszenarien kombiniert.

Die Untersuchung fokussiert auf Geschosßwohngebäude mit einer prinzipiellen Übertragbarkeit auf die Nutzung als Büro oder Mischform aus Büro und Wohnung. Von besonderer Bedeutung sind dabei realistische nutzbare thermische Speichermassen. Weitere ebenfalls wichtige Parameter in Bezug auf Schallschutz, Tragfähigkeit, hygrische

Speicherfähigkeit, in möglichst sortenreinen Konstruktionen werden im Rahmen dieses Projekts prinzipiell bewertet. Hieraus wird ein für Planer und ausführende Firmen geeignetes Bewertungs- und Auswahlssystem unter Berücksichtigung zugehöriger Varianzen als Demonstrator entwickelt, welcher standortabhängige Lösungen bietet.

Klimatische Randbedingungen

Zur Umsetzung der formulierten Zielsetzung werden klimatische Randbedingungen für drei repräsentative Standorte in Deutschland (warm, mittel, kühl) mit und ohne Verschattung sowie mit einer Hitzeinsel bis zum Jahr 2050 auf der Grundlage von verschiedenen existierenden Szenarien definiert. Geeignete Standorte sowie Klimadaten aus typischen Klimawandelszenarien werden verwendet.

In den letzten zehn Jahren wurden immer neue Temperaturrekorde festgestellt, die sich auch im weltweiten Anstieg der Trockentemperaturen widerspiegeln. Das Jahr 2018 war mit einer Durchschnittstemperatur von 10,5 °C das wärmste Jahr in Deutschland seit Beginn der regelmäßigen Messungen im Jahr 1881. (Friedrich und Kaspar, 2019) Darüber hinaus wird 2020 als zweitwärmstes Jahr (10,4 °C) registriert und 2019 sowie 2014 belegen mit einer Durchschnittstemperatur von jeweils 10,3 °C den dritten Platz. Im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961 bis 1990 weisen die oben genannten Jahre ein Delta von über 2 K auf. (DWD, 2021) Dies korreliert mit der Darstellung der Temperaturanomalie in Abbildung 1, welche einen kontinuierlichen Temperaturanstieg seit 1980 erkennen lässt.

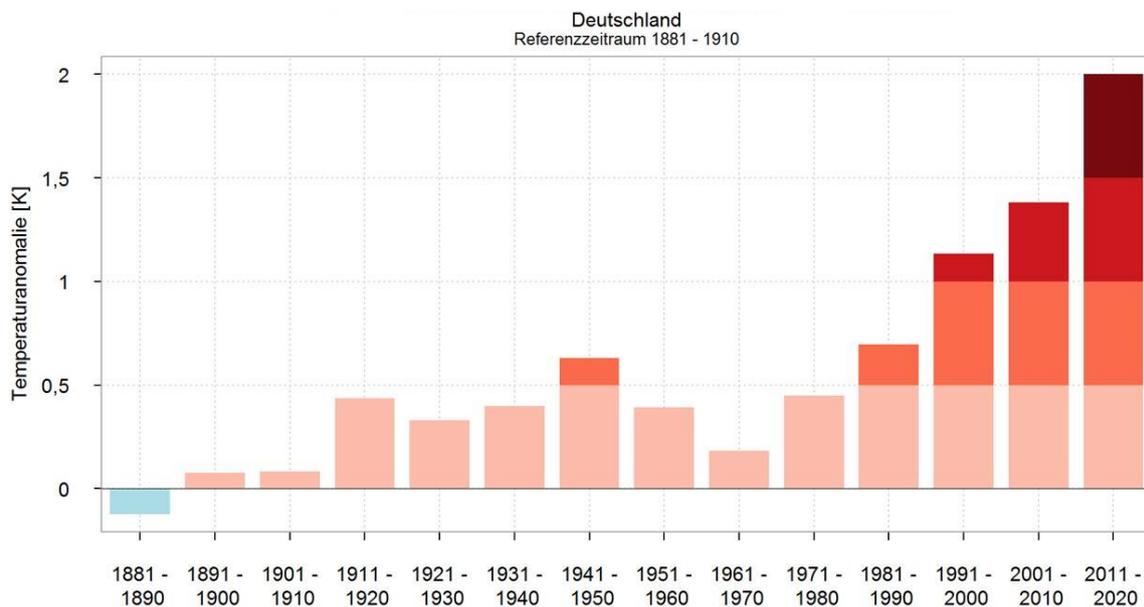


Abbildung 1: Abweichungen der 10-Jahresperioden 1881 – 1890 bis 2011 – 2020 von dem vieljährigen Temperaturmittel 1881 – 1910 (DWD, 2021)

Neben den Durchschnittstemperaturen treten auch die Temperaturspitzen immer häufiger und intensiver auf. Die Auswertung der Tage mit einer Tageshöchsttemperatur von mindestens 25 °C (Sommertage) und Tagen mit einer Tageshöchsttemperatur von über 30 °C (Heiße Tage) in den letzten 70 Jahren zeigt einen deutlichen Trend, bei dem sich die Sommertage verdoppelt haben und die heißen Tage dreimal so häufig sind, wie Mitte des letzten Jahrhunderts.

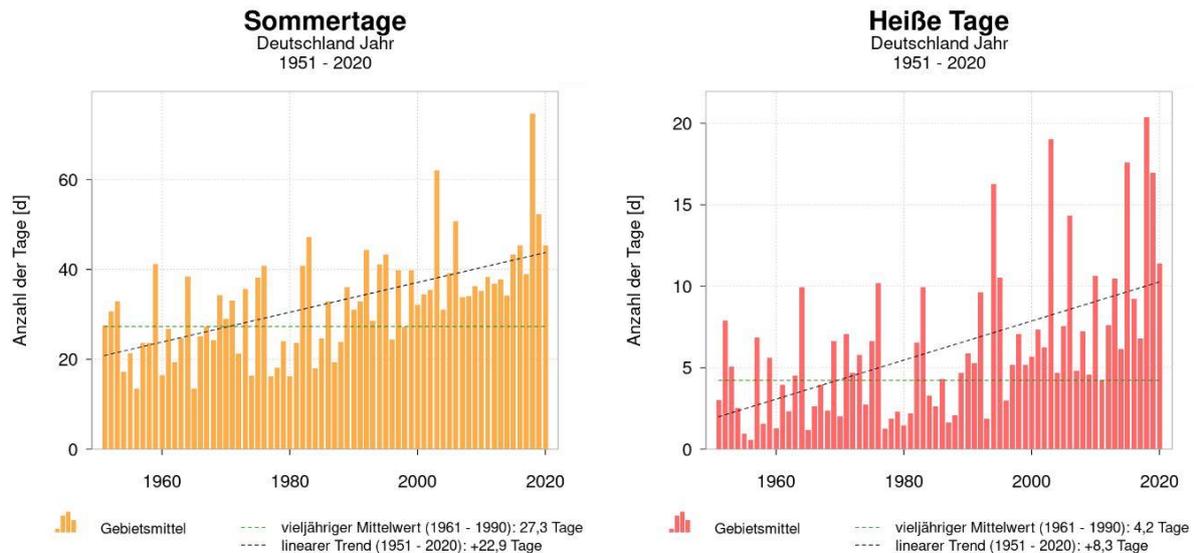


Abbildung 2: Sommer- und Hitzetage in Deutschland 1951 bis 2020 (DWD, 2021)

Ein ähnliches Bild zeigt sich ebenfalls in Deutschlands Nachbarländern. So lag beispielsweise die nationale Durchschnittstemperatur in Frankreich Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts bei 12,1 °C, während die Durchschnittstemperatur im letzten Jahrzehnt bei 14,2 °C lag. (Eglitis, 2021)

Dieser Anstieg von +2 K stellt eine große Herausforderung in Bezug auf den Innenraumkomfort dar. Insbesondere in Wohngebäuden können aufgrund von fehlenden Kühlsystemen und der langjährigen Fokussierung auf die Energieeinsparung in der Heizperiode erhebliche Überhitzungen, welche sich auf das thermische Wohlbefinden und die Gesundheit der Nutzenende auswirken, auftreten.

Klimadaten

Geeignete Klimadaten stellen einen entscheidenden Input für die vorliegende Untersuchung dar. Während in einzelnen normativen Vorgaben (z. B. DIN V 18599-10:2018-09) oder Bemessungshilfen lediglich durchschnittliche Monatswerte gefordert werden, werden für die thermische Simulation stündliche Datensätze des spezifischen Untersuchungsortes benötigt. Diese Klimadatensätze werden u.a. vom Deutschen Wetterdienst (DWD) in Form von repräsentativen, synthetischen Klimadatensätzen, auch Testreferenzjahre (TRY) genannt, bereitgestellt. (DWD, 2020) Das Klimaberatungsmodul des Deutschen Wetterdienstes stellt den Testreferenzjahr-Datensatz in 15 TRY-Klimaregionen Deutschlands zur Verfügung mit folgender Unterteilung:

- TRY-15 (Normales Jahr): Realwetterabschnitte aus den Jahren 1995 bis 2012 mit stündlichen Daten, die so aufgebaut sind, dass die Abweichungen vom langjährigen Monats- und Saisonmittel gering sind. Um eine Rasterschärfe von 1 km² zu erreichen, wird zwischen zahlreichen DWD-Wetterstationen eine räumliche Interpolation unter Berücksichtigung der Topographie durchgeführt.
- TRY-15s (mit sommer-fokussiertem Jahr): Diese TRY-Datensätze bauen auf Abschnitten von extremen Realwetterdaten auf. Für einen extremen Sommer stammen die Messdaten aus dem drittwärmsten Sommerhalbjahr (April bis September) des jeweiligen Standorts.
- TRY-15w (mit winter-fokussiertem Jahr): Für diesen Fall stammen die Messdaten hier in ähnlicher Weise aus den bestehenden Daten des drittkältesten Winterhalbjahrs (Oktober bis März) des jeweiligen Standorts.

Zusätzlich zu den aktuellen Datensätzen stellt der DWD auch Wetterdatensätze zur Abschätzung des Klimas in den kommenden Jahrzehnten zur Verfügung. Die Datensätze TRY-45 beziehen sich auf Klimaprognosen für

den Zeitraum 2031-2060 und sind in den gleichen Formaten wie die Daten des TRY-15 verfügbar (Krähenmann, 2017). Diese Wetterdatensätze sind aus realen Wetterfragmenten zusammengesetzt, die zwischen 1995-2012 aufgetreten sind, wobei zusätzlich jährliche Veränderungen berücksichtigt werden.

Alternative Wetterdatensätze für Zukunftsszenarien können u.a. über die Software Meteororm bezogen werden. Diese Klimadatensätze wurden für verschiedene repräsentative Konzentrationspfade (Representative Concentration Pathways, RCP) abgeleitet, die vom IPCC entwickelt wurden. Diese Szenarien berücksichtigen die Treibhausgasemissionen sowie die Konzentration von Aerosolen und chemisch aktiven Gasen in Verbindung mit aktuellen und zukünftigen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Maßnahmen. Es existieren vier repräsentative Szenarien: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5. Die Zahlenangabe steht hierbei für einen möglichen spezifischen Treibhauseffekt, der bis 2100 auftreten kann. (IPCC, 2022)

Klimaanalyse

Um die Klimaunterschiede in Deutschland besser einschätzen zu können, werden die TRY-Datensätze des DWD mit den zugehörigen Klimawandelszenarien für repräsentative Standorte analysiert. Es wird ein Vergleich mit gemessenen Wetterdaten an den Standorten durchgeführt, damit abgeschätzt werden kann, ob die TRY-Datensätze für die nachfolgenden Untersuchungen geeignet sind.

Repräsentative Standorte

Nach DIN 4108-2 gibt es in Deutschland drei Sommertypen, die sich in drei Klimaregionen einteilen lassen:

- Kalte Sommer: Klimaregion A
- Milde Sommer: Klimaregion B
- Warme Sommer: Klimaregion C

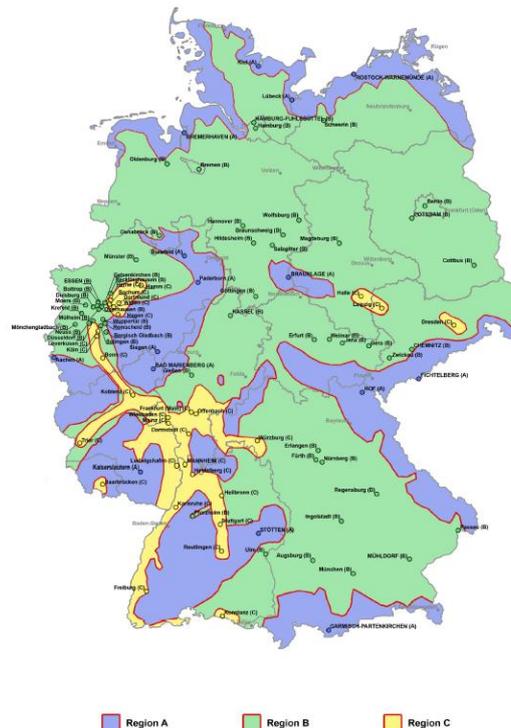


Abbildung 3: Klimakarte zur Zuordnung der Sommer-Klimaregion (DIN 4108-2:2013-02)

Tabelle 1 zeigt die Städte, die in früheren Studien ausgewählt wurden, um die drei Klimaregionen zu repräsentieren sowie die zugehörigen TRY-Zonen.

Tabelle 1: Sommer-Klimaregionen

Klimaregion nach DIN 4108-2	repräsentativer Standort	zugehörige TRY-Zone
Klimaregion A (kalt)	Rostock	TRY Zone 2
Klimaregion B (mild)	Potsdam	TRY Zone 4
Klimaregion C (warm)	Mannheim	TRY Zone 12

Der DWD veröffentlicht die TRY-Wetterdaten in einem Raster von 1 km². Dieses Raster ermöglicht es, die Unterschiede zwischen innerstädtischen und vorstädtischen Randbedingungen zu untersuchen. Die folgenden Koordinaten werden für diese Analyse ausgewählt.



Abbildung 4: Klimaregion A (Rostock) - Vorort: 54,1817° N 12,0824° O / Innenstadt: 54,0878° N 12,1412° O



Abbildung 5: Klimaregion B (Potsdam) - Vorort: 52,3845° N 13,0645° O / Innenstadt: 52,4031° N 13,0658° O



Abbildung 6: Klimaregion C (Mannheim) - Vorort: 49,5100° N 8,5489° O / Innenstadt: 49,4902° N 8,4637° O

Vergleich der Standorte

Das Potenzial von Konstruktionen mit höheren Rohdichten wird unter Berücksichtigung von Klimawandelszenarien (IPCC, 2014) erforscht. Die zukünftigen Sommermonate sind gekennzeichnet durch häufigere und intensivere Hitzewellen (Umweltbundesamt, 2014), weswegen die Klimaanalyse auf den Zeitraum des Sommerhalbjahres fokussiert. Eine Auswertung zu den Lufttemperaturen im Sommerhalbjahr und den klimatologischen Kennzahlen bezogen auf die Sommertage, die Hitzetage und die Tropennächte wird hier gezeigt. Um die klimatischen Unterschiede zwischen den Standorten darzustellen, wird im Folgenden eine Reihe von Vergleichen zu den jeweiligen Standorten durchgeführt.

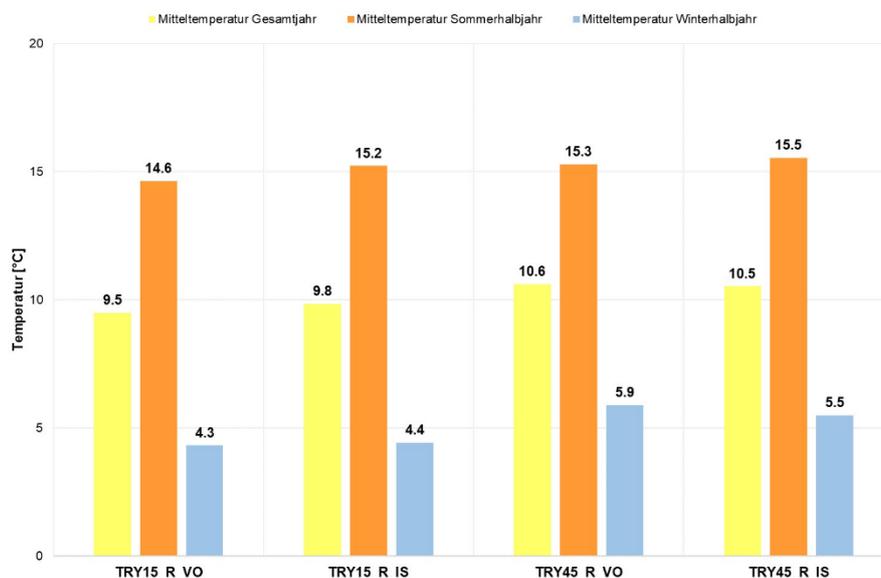


Abbildung 7: TRY-15 und TRY-45 Temperaturen Rostock

Die TRY-15 Datensätze für den Standort Rostock zeigen, dass in der Innenstadt höhere Temperaturen auftreten als im Vorort (Abbildung 7). Die größte Differenz von 0,6 °C ist im Sommerhalbjahr zu erkennen, während die Differenz im Winterhalbjahr lediglich bei 0,1 °C liegt. Die TRY-45 Datensätze zeigen, dass in der Innenstadt leicht höhere Temperaturen während der Sommerperiode auftreten. Die Mitteltemperaturen für das Gesamtjahr und das Winterhalbjahr sind dagegen niedriger in der Innenstadt im Vergleich zum Vorort. Zudem ist zu erkennen, dass die durchschnittlichen Temperaturen sowohl im Vorort als auch in der Innenstadt ansteigen werden.

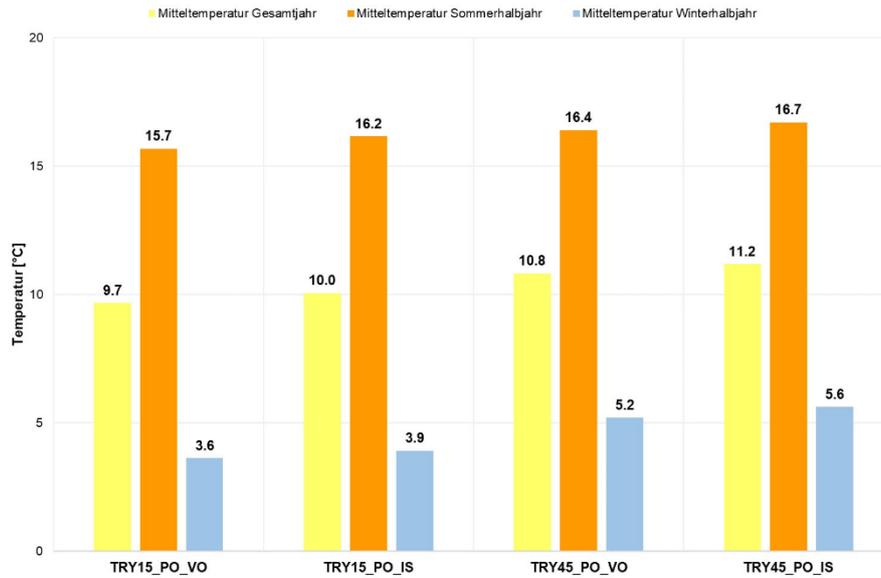


Abbildung 8: TRY-15 und TRY-45 Temperaturen Potsdam

Die TRY-15 Datensätze für den Standort Potsdam zeigen, dass die Innenstadt während des gesamten Jahres höhere Temperaturen aufweist (Abbildung 8). Die größte Differenz von 0,5 °C zwischen Innenstadt und Vorort ist im Sommerhalbjahr zu erkennen. Ebenso ist im Winterhalbjahr eine Differenz von 0,3 °C zwischen Vorort und Innenstadt erkennbar. Dieser Unterschied ist im Verhältnis zu größeren Städten und bei besonderen topografischen Gegebenheiten als relativ gering einzuordnen (Glossary of Meteorology, 2019). Die TRY-45 Datensätze zeigen, dass die Temperaturen sowohl für die Innenstadt als auch für den Vorort, insbesondere im Winterhalbjahr, ansteigen werden. Die Differenz zwischen Innenstadt und Vorort liegt jedoch nur noch bei 0,3 °C.

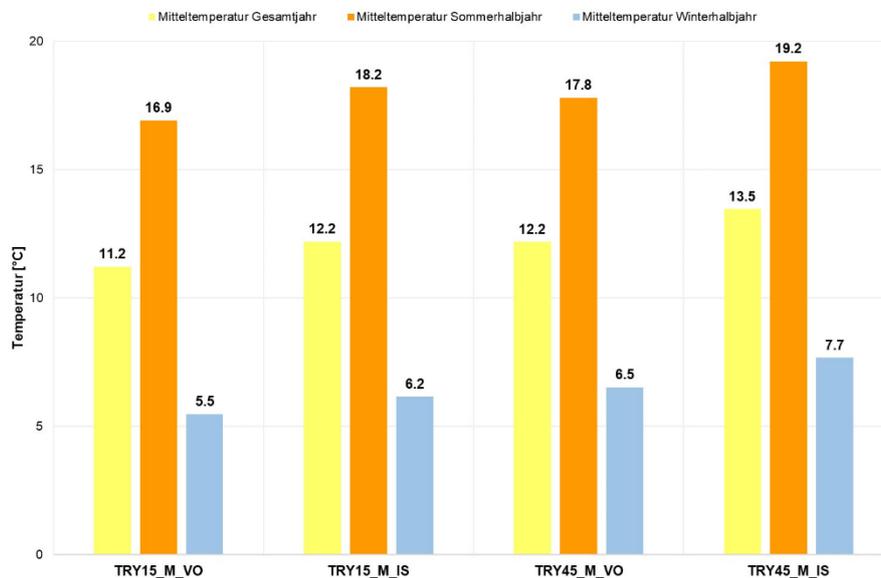


Abbildung 9: TRY-15 und TRY-45 Temperaturen Mannheim

Die TRY-15 Datensätze für den Standort Mannheim zeigen, dass die Innenstadt im Vergleich zum Vorort höhere Temperaturen aufweist. Die größte Differenz von 1,3 °C ist für das Sommerhalbjahr zu erkennen. Zudem beträgt die Differenz der Mitteltemperatur für das Gesamtjahr 1,0 °C. Während des Winterhalbjahres liegen die Temperaturen im Vorort im Durchschnitt 0,7 °C niedriger als in der Innenstadt. Die TRY-45

Datensätze zeigen, dass es zukünftig einen ähnlichen Temperaturunterschied zwischen Innenstadt und Vorort geben wird. Der Vergleich zwischen TRY-15 und TRY-45 ergibt bedeutende Temperaturerhöhungen für die Standorte Potsdam und Mannheim. Das Sommerhalbjahr und das Winterhalbjahr werden etwa 1,0 °C wärmer angegeben. Die Mitteltemperatur zwischen April und September wird demnach in den Innenstädten fast 20,0 °C erreichen.

Mitteltemperaturen im Sommerhalbjahr

Die durchschnittlichen Temperaturen im Sommerhalbjahr der Datensätze TRY-15 und TRY-45 können als Bestätigung für die Unterteilung von Deutschland in drei Klimaregionen aufgefasst werden. Unabhängig von der Betrachtung in Bezug auf Vorort oder Innenstadt existiert eine Temperaturdifferenz von mindestens ±1 K bei den verschiedenen Klimaregionen.

Einen bedeutenden Temperaturunterschied ergibt sich in der Gegenwart zwischen Klimaregion C und den anderen beiden Klimaregionen in Bezug auf die Innenstadt. Dieser beträgt 2,0 °C gegenüber Klimaregion B und 3,0 °C gegenüber Klimaregion A. Entsprechend der Daten des TRY-45 wird sich diese Differenz in den kommenden Jahren weiter erhöhen. In der Zukunft wird im Sommerhalbjahr Klimaregion C durchschnittlich 3,7 °C wärmer sein als Klimaregion A.

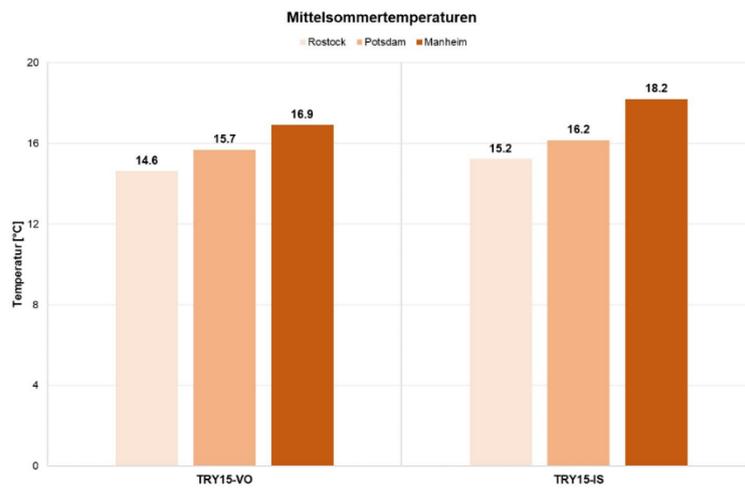


Abbildung 10: TRY-15 Mittelsommertemperaturen

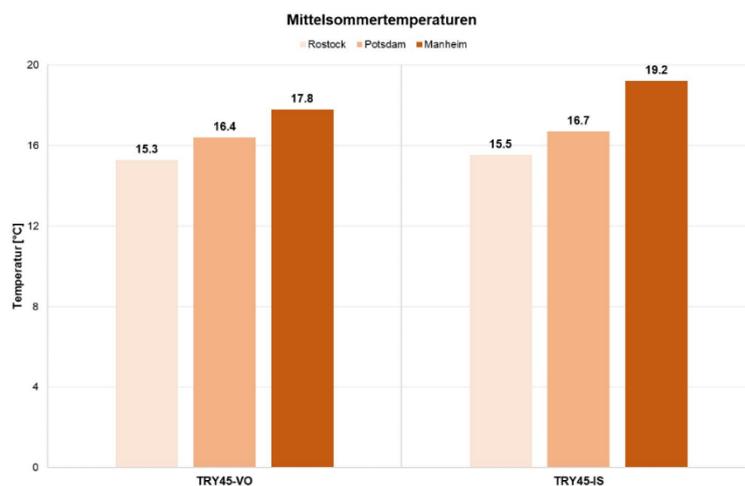


Abbildung 11: TRY-45 Mittelsommertemperaturen

Abbildung 10 und Abbildung 11 stellen die Temperaturänderungen zwischen heute und der Zukunft für jeden der drei Standorte dar. Insgesamt werden die Temperaturen in Deutschland ansteigen, allerdings gibt es Unterschiede in Abhängigkeit vom jeweiligen Standort. Laut der Wetterdatensätze des DWD werden in der Klimaregion A und Klimaregion B die Sommerhalbjahr-Temperaturen in den Vororten stärker steigen als in den Innenstädten. Während in den Innenstädten die Temperatursteigerung unter 0,5 °C liegt, liegt der Anstieg in den Vororten weit über 0,5 °C. Diese Veränderung gilt jedoch nur für Klimaregionen A und B. In Klimaregion C werden die Temperaturen im Sommerhalbjahr sowohl in der Innenstadt als auch im Vorort deutlich stärker steigen und zeigen im Vergleich zum TRY-15 eine Differenz von circa 1,0 °C.

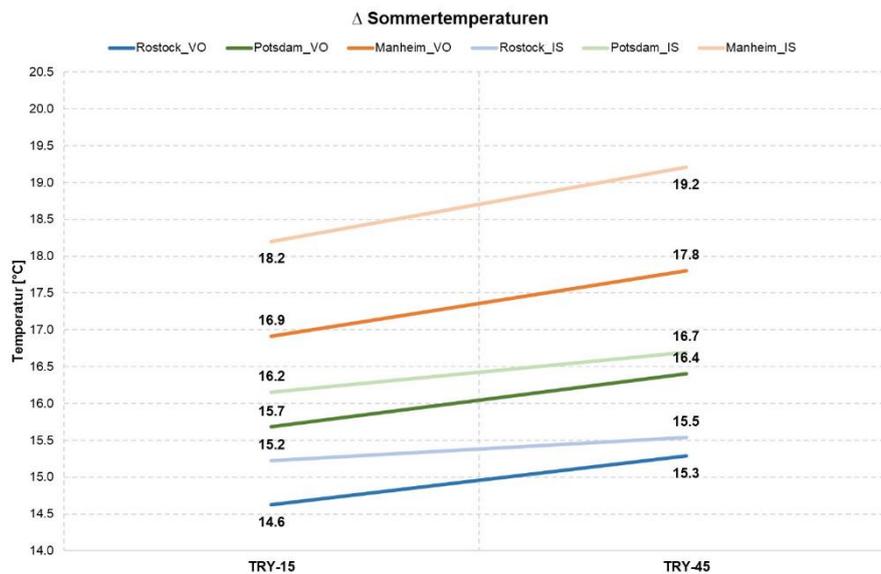


Abbildung 12: Vergleich der Mittelsommertemperaturen im Vorort (VO) und in der Innenstadt (IS) der drei Standorte

Klimatologische Kenntage

Als klimatologische Kenntage werden hier Sommertage, Hitzetage und Tropennächte berücksichtigt. An Sommertagen liegt die maximale Temperatur bei mindestens 25,0 °C und an Hitzetagen bei mindestens 30,0 °C. Tropennächte werden dagegen dadurch definiert, dass die minimale Temperatur nicht niedriger als 20,0 °C ist. (Deutscher Wetterdienst, 2023)

Beim Vergleich der Sommertage in der Gegenwart und in der Zukunft fällt auf, dass es in allen Städten einen Anstieg bei der Häufigkeit dieser Ereignisse geben wird mit unterschiedlichen Entwicklungen für die Standorte (siehe Abbildung 13). In Klimaregion A gibt es zurzeit mehr als doppelt so viele Sommertage in der Innenstadt im Vergleich zum Vorort. Die TRY-45-Daten sagen einen höheren Anstieg der Sommertage im Vorort voraus (200 % gegenüber 31 % in der Innenstadt). Insgesamt wird es in der Klimaregion A zukünftig doppelt so viele Sommertage geben als dies heute der Fall ist und in Klimaregion B zeigt sich eine gegenteilige Entwicklung. Derzeit entstehen ähnlich viele Sommertage in der Innenstadt und im Vorort, jedoch werden in der Innenstadt in Zukunft mehr Sommertage auftreten als im Vorort. Durch die Mittelung der beiden zugehörigen Werte kann festgestellt werden, dass der Anstieg der Sommertage in dieser Region etwa 50 % beträgt. In der Klimaregion C tritt der Anstieg sowohl im Vorort als auch in der Innenstadt in ähnlicher Weise auf. Ausgehend von den Daten des TRY-45 wird es in der Klimaregion C im Durchschnitt pro Jahr mehr als 70 Tage mit Temperaturen über 25,0 °C geben.

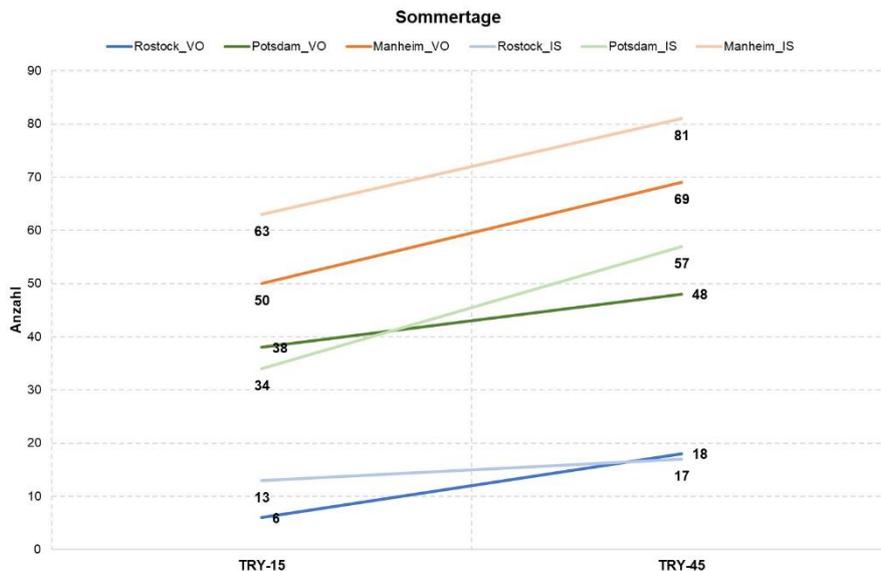


Abbildung 13: Vergleich der Sommertage im Vorort (VO) und in der Innenstadt (IS) der drei Standorte

Bei der Analyse der Anzahl der Hitzetage sind ebenfalls Unterschiede zwischen den untersuchten Regionen festzustellen. Sowohl Klimaregion A als auch Klimaregion B weisen einen moderaten Anstieg der Anzahl der Hitzetage auf. Allerdings gibt es in Klimaregion B im Vergleich zu Klimaregion A durchschnittlich 10 Mal so viele Tage mit Temperaturen über 30,0 °C. In Klimaregion C ist der Anstieg beträchtlich, insbesondere im Vorort, wobei der Anstieg 125 % beträgt. Generell kann festgestellt werden, dass die Veränderungen der Hitzetage nur in Klimaregion C relevant sind, wo nach den TRY-45-Daten an etwa 7 % der Tage im Jahr Temperaturen über 30,0 °C erreicht werden.

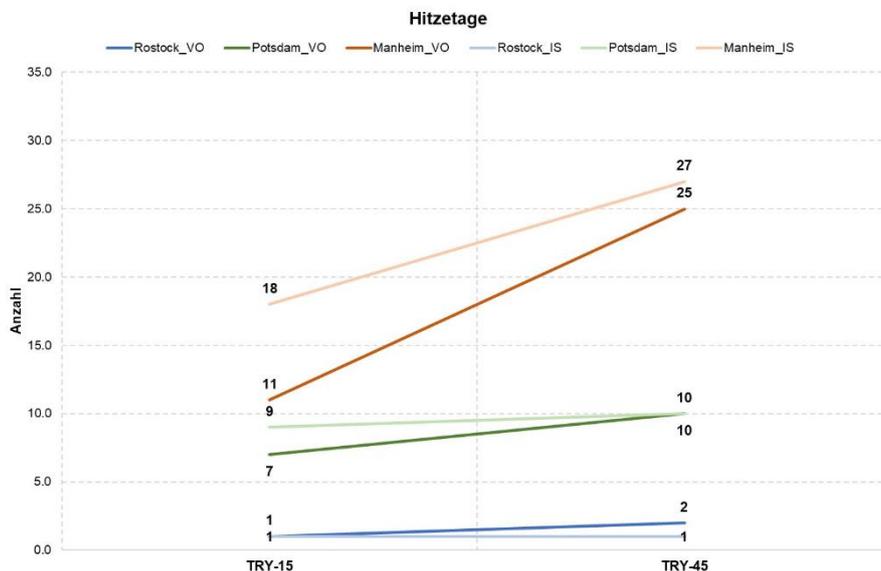


Abbildung 14: Vergleich der Hitzetage im Vorort (VO) und in der Innenstadt (IS) der drei Standorte

Die Anzahl der Tropennächte an den verschiedenen untersuchten Standorten ist in allen Fällen ähnlich, außer in der Innenstadt der Klimaregion C. Gegenwärtig werden 14 Nächte prognostiziert, in denen die Temperaturen nicht unter 20,0 °C fallen. Diese Zahl wird um 65 % steigen. An den anderen Standorten entstehen derzeit nur wenige Tropennächte. In Zukunft wird die Zahl der Tropennächte zunehmen, aber die Häufigkeit im Jahresverlauf ist lediglich von geringer Bedeutung.

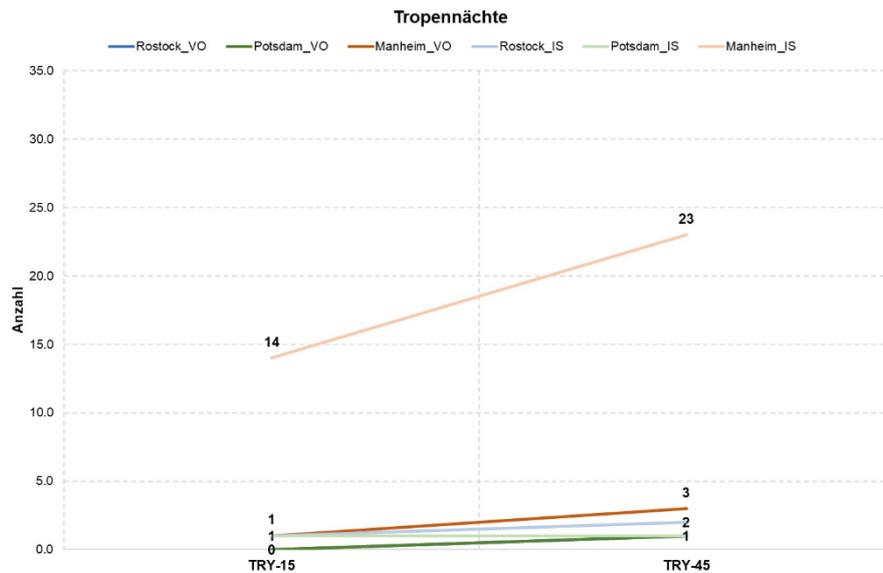


Abbildung 15: Vergleich der Tropennächte im Vorort (VO) und in der Innenstadt (IS) der drei Standorte

Messdaten an den Standorten

Zur besseren Einordnung der Daten des TRY-15 und TRY-45, werden die Daten mit aktuellen Klimamessungen an den drei Standorten verglichen. Im Folgenden wird die Analyse der meteorologischen Daten (2016-2021) an den Stationen in den drei Referenzstädten vorgestellt.

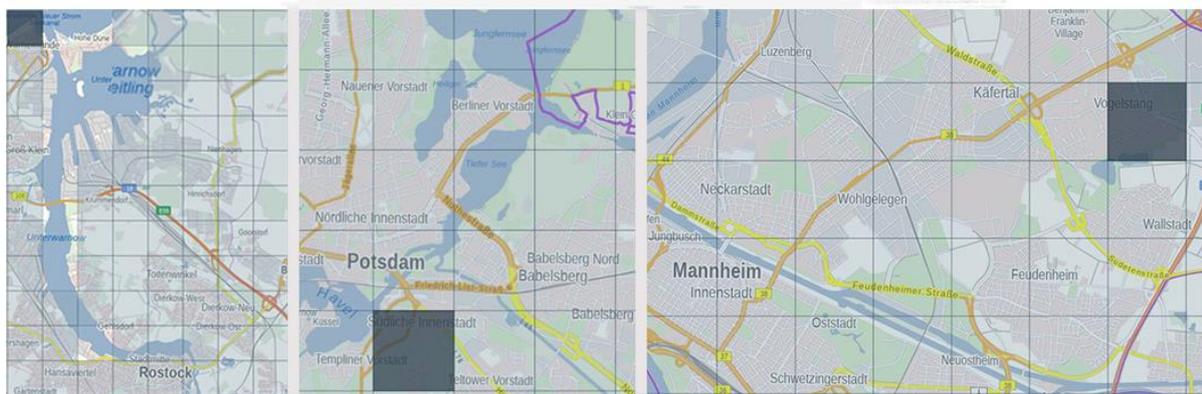


Abbildung 16: Standorte der Messstationen

In Rostock war 2018 ein besonders warmes Jahr. Im Vergleich zu 2020 gab es doppelt so viele Hitzetage, mehr als doppelt so viele Sommertage und neunmal mehr Tropennächte. Das Jahr 2017 war hingegen relativ moderat.

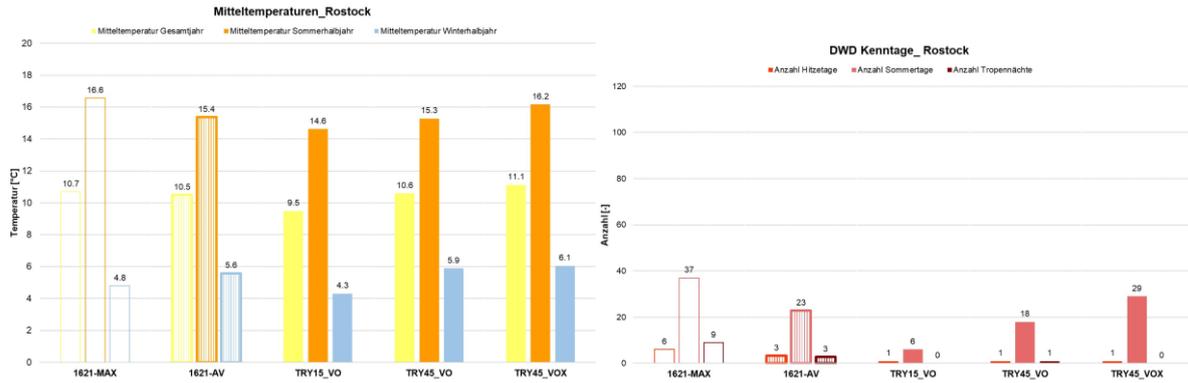


Abbildung 17: Gemessene Temperaturen und Kenntage in Rostock von 2016 bis 2021

In Potsdam war 2018 ebenfalls ein besonders warmes Jahr. Im Vergleich zu 2020 gab es doppelt so viele Hitzetage und Tropennächte und 80 % mehr Sommertage. Das Jahr 2017 war hingegen ebenfalls relativ moderat.

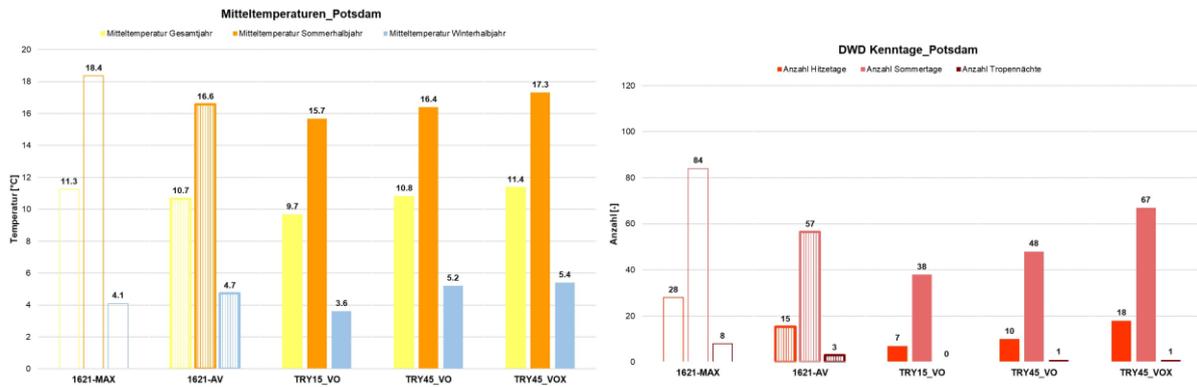


Abbildung 18: Gemessene Temperaturen und Kenntage in Potsdam von 2016 bis 2021

Das gleiche Bild zeigt sich für Mannheim in Bezug auf das Jahr 2018. Im Vergleich zu 2021 gab es doppelt so viele Hitzetage, 50 % mehr Sommertage und 50 % mehr Tropennächte. Im Gegensatz zu den beiden anderen Klimaregionen war jedoch nicht das Jahr 2017, sondern das Jahr 2021 das Jahr mit den niedrigsten Sommertemperaturen.

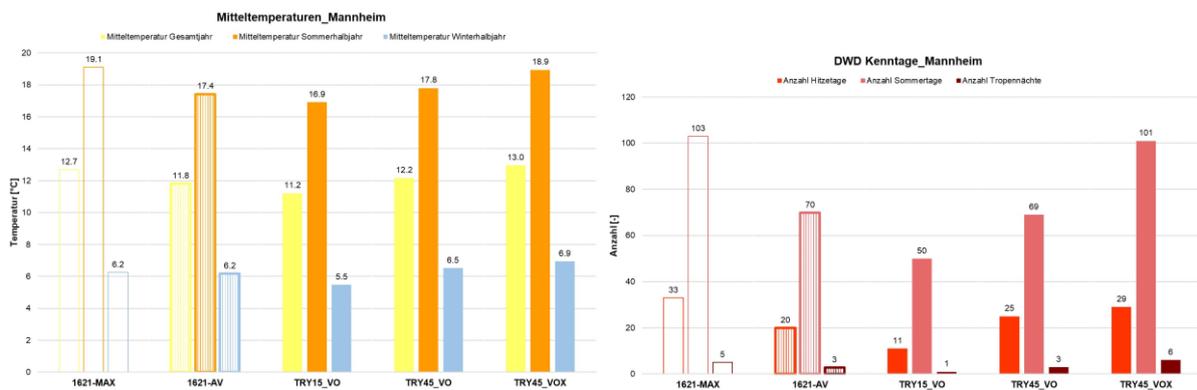


Abbildung 19: Gemessene Temperaturen und Kenntage in Mannheim von 2016 bis 2021

Vergleich der TRY-Wetterdatensätze und der Messdaten

Die Standorte der Wetterstationen in den Vororten stimmen mit den Standorten der TRY-Datensätze überein. Somit ist ein direkter Vergleich zwischen den beiden Datensätzen möglich. Zum einen werden die Durchschnittstemperaturen und zum anderen die Kenntage verglichen, wobei die Messungen als Durchschnittswert (1621-Av) und Maximalwert (1621-Max) zusammengefasst werden. Außerdem werden die Werte für die Testreferenzjahre (TRY-15 und TRY-45) für den Normalfall (VO) und den extremen Sommerfall (VOX) dargestellt.

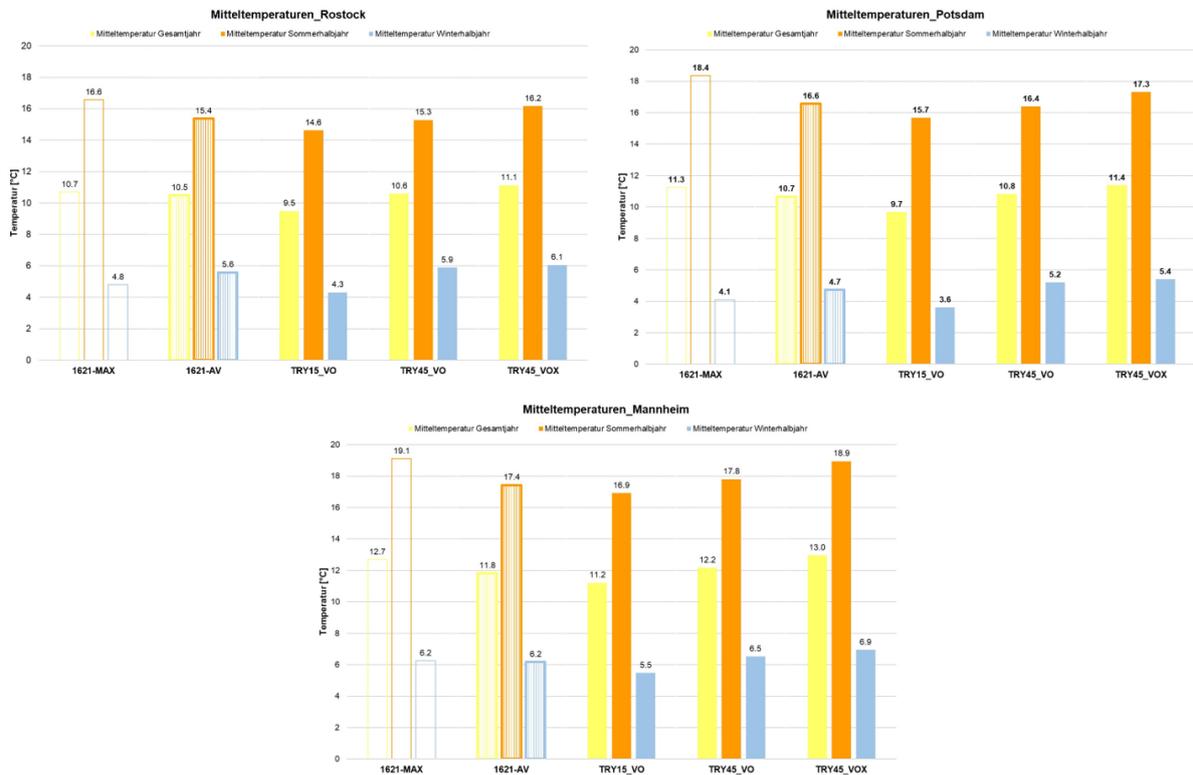


Abbildung 20: Vergleich der Mitteltemperaturen der drei Standorte

Die durchschnittlichen Werte der Messdaten werden jedoch durch die TRY-15 VO-Werte nicht genau genug wiedergegeben. In diesen Fällen liegen die Durchschnittstemperaturen des Sommerhalbjahres und des Winterhalbjahres näher an den Werten des Datensatzes TRY-45 VO.

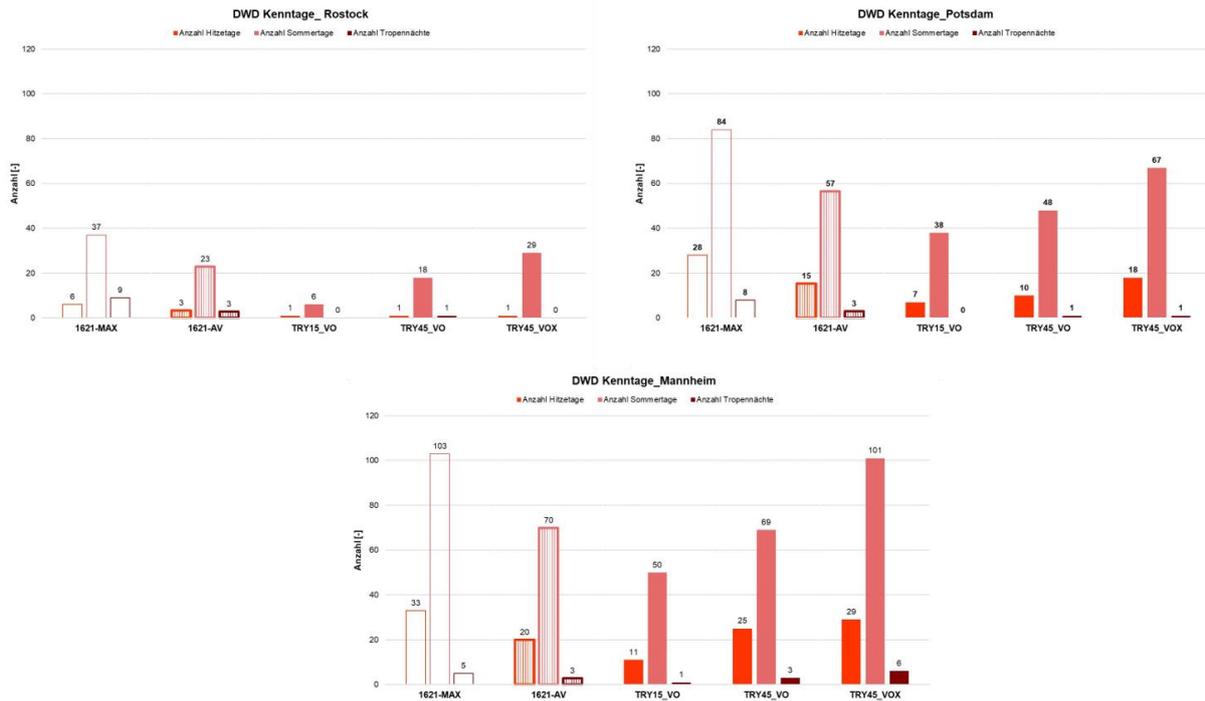


Abbildung 21: Vergleich der Kenntage der drei Standorte

Hinsichtlich der Anzahl der Sommertage, Hitzetage und Tropennächte liegt der Durchschnitt der Messungen deutlich über den Werten der TRY-15 VO für alle Klimaregionen. In Klimaregion C ähneln die gemessenen Werte eher den Werten des TRY-45 VO. Für die Klimaregion A und die Klimaregion B liegen sie zwischen den Daten des TRY-45 VO und des TRY-45 VOX.

Fazit bezüglich anwendbarer klimatischer Randbedingungen

Klimadatensätze aus den Jahren 2022 und 2023 wurden nicht berücksichtigt, da diese Analyse erstellt wurde, bevor die Datensätze verfügbar waren. Die Tatsache, dass die Jahre 2022 und 2023 die bisher wärmsten aufgezeichneten Jahre waren (DWD, 2023), unterstreicht die hier formulierte These bezüglich der für die Simulation verwendeten Wetterdaten.

Aus den vorangegangenen Analysen kann geschlossen werden, dass die TRY-15 Datensätze veraltet sind und nicht die aktuellen klimatischen Bedingungen repräsentieren und damit auch nicht in heute gültigen Normen Verwendung finden sollten. Die Werte, die mit der Messung von Mitteltemperaturen, Hitzetagen oder Tropennächten verbunden sind, werden durch die klimatischen Bedingungen der TRY-45 Datensätze sinnvoller dargestellt. Für die vorliegende Studie werden die TRY 45 VO Datensätze als Referenz für die aktuellen klimatischen Bedingungen im Vorort angenommen. Zur Darstellung des aktuellen Klimas in den Stadtzentren werden die Daten von TRY-45 VOX verwendet.

In Ermangelung von Prognosen des DWD, die über TRY-45 VOX hinausgehen, werden die Wetterdatensätze RCP 4.5 2080 von Meteonorm als repräsentative Klimata für die Mitte des 21. Jahrhunderts angenommen.

Auswahl der Modellgebäude

Die Untersuchungen und Vergleiche von Bauteilen mit unterschiedlichen Rohdichten erfolgen in der vorliegenden Studie für ein mehrgeschossiges Mehrfamilienhaus (MFH). Hier wurde ein Gebäude gewählt, das den deutschen Mietwohnungsbau möglichst gut repräsentiert und dennoch auch in Grenzen für Mischnutzungen und Büronutzungen verwendet werden kann. Reine Bürogebäude in Stahlbetonskelettbauweise mit vorgehängten Glasfassaden werden nicht berücksichtigt. Mustergebäude wurden bereits in anderen Forschungsprojekten entwickelt wie z. B. in Klauß und Maas (2010) und Walberg et al. (2015) und u.a. für Simulationszwecke verwendet.

Im Rahmen einer Studie der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen (Walberg et al., 2015), in der Massivbauweisen im Vergleich zu Holzbauweisen bezüglich Baukosten, Bautechnik sowie nachhaltige Aspekte untersucht wurden, wurden hierfür ein Typengebäude „Einfamilienhaus“ und ein Typengebäude „Mehrfamilienhaus“ (dargestellt in Abbildung 22) entwickelt. Die Typengebäude basieren u. a. auf Daten statistischer Auswertungen und allgemeinen Marktbeobachtungen und stellen so ein repräsentatives Mittel in der derzeitigen Baupraxis dar. Die Typengebäude kamen in anderen Forschungsarbeiten wie Kornadt et al. (2019) sowie Holm et al. (2021) zur Anwendung.

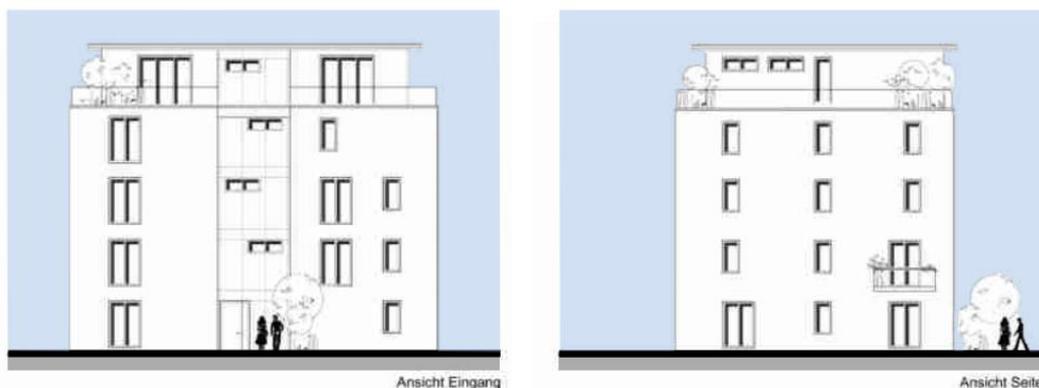


Abbildung 22: MFH mit Raumzonen aus Walberg et al. (2015)

Klauß und Maas (2010) erarbeiteten im Forschungsprojekt „Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit“, gefördert von der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“, eine Sammlung von 15 Wohngebäuden und 22 Nichtwohngebäuden. Auch hier wurden statistische Daten für die Erstellung der Modellgebäude zu Grunde gelegt. Die Modellgebäude von Klauß und Maas (2010) sind bereits mehrfach für Untersuchungen in anderweitigen Studien zur Anwendung gekommen (Doleski, 2020; Müller und Pfnür, 2016; Offermann et al., 2013; Schöndube et al., 2018; Freis et al., 2016; Wörner et al., 2019) und gelten für den zukünftigen Neubaubestand in Deutschland als ausreichend repräsentativ (Klauß und Maas, 2010; Offermann et al., 2013). Wie in vorheriger Studie wurden dafür die wesentlichen Strukturen aus den Grundrissen der Quellen übernommen. Detaillierte Grundrisse für das Modellgebäude „Mehrfamilienhaus klein“ wurden allerdings im Rahmen eines Projektes des Ingenieurbüros Prof. Dr. Hauser GmbH dargestellt (zitiert nach Schlitzberger et al. (2017)).

Für die vorliegende Studie wird das Modellgebäude „MFH klein“ von Klauß und Maas (2010) verwendet (dargestellt in Abbildung 23). Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass die Arbeit von Klauß und Maas relativ viele Gebäudetypen enthält und infolgedessen häufiger in anderen Forschungsarbeiten herangezogen wurde im Vergleich zum Typengebäude von Walberg et al. (2015).



Abbildung 23: MFH klein aus (Klauß und Maas 2010)

Der Fokus dieses Forschungsvorhabens liegt auf dem sommerlichen Wärmeschutz, daher ist eine raumweise Betrachtung von besonders kritischen Räumen (z. B. kleine Aufenthaltsräume, Eckzimmer) erforderlich. Hierfür wurden Grundriss bzw. Gebäudegeometrie leicht angepasst, um solche kritischen Räume zu erzeugen (dargestellt in Abbildung 24). Weiterhin wurde das Modellgebäude zu einem freistehenden Mehrfamilienhaus abgeändert. Als kritische Räume wurden die Zimmer 1 (Reihenzimmer) und Zimmer 2 (Eckzimmer) definiert. Beide Zimmer werden für die weitere Untersuchung als Schlafzimmer und Arbeitszimmer angesehen.

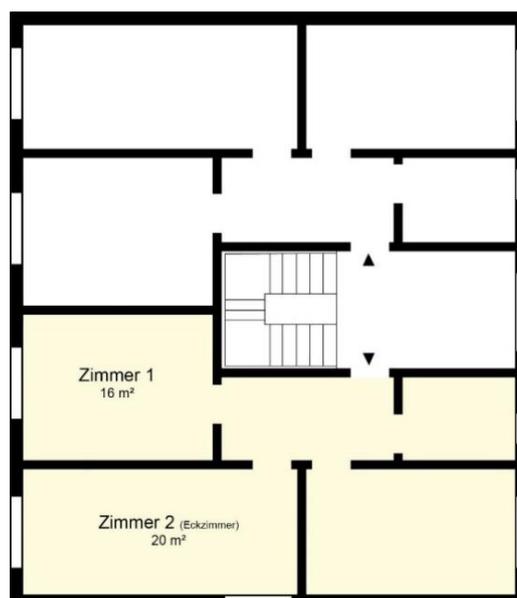


Abbildung 24: Grundriss des angepassten Modellgebäudes (eigene Darstellung nach Schlitzberger et al. (2017))

Randbedingungen und Anforderungen

Im folgenden Kapitel werden sämtliche Randbedingungen, die für die anschließenden Simulationen angesetzt wurden, ausführlich dargestellt.

Allgemeine Randbedingungen

In Tabelle 2 sind die allgemeinen Randbedingungen zur thermischen Simulation des Mehrfamilienhauses abgebildet. Diese orientieren sich an der DIN 4108-2:2013-02 und DIN V 18599-10:2018-09.

Tabelle 2: Randbedingungen für thermische Simulation des Mehrfamilienhauses

Kenngröße	Randbedingungen	Anmerkung
Raum-Solltemperatur θ_{Soll}	$20\text{ °C} \geq \theta_{i,\text{Soll}} \leq 25\text{ °C}$	DIN V 18599-10, DIN 4108-2
Nachtabsenkung	$\Delta\theta_{i,\text{NA}} = 4\text{ K}$	DIN V 18599-10
Interne Wärmequellen	s. Tagesprofile in Tabelle 3	
Nutzungszeiten	s. Tagesprofile in Tabelle 3	
Jährliche Nutzungstage	365 d/a	DIN V 18599-10, DIN 4108-2
Tägl. Betriebszeit Heizung	6:00 Uhr bis 23:00 Uhr	DIN V 18599-10
Grundluftwechsel	$n = 0,5\text{ h}^{-1}$	DIN V 18599-10, DIN 4108-2
Erhöhter Tagluftwechsel	$n = 3\text{ bis }5\text{ h}^{-1}$ (6:00 bis 23:00 Uhr), s. Tagesprofile in Tabelle 4	Je nach Raum- und Belegungssituation
Erhöhter Nachtluftwechsel	$n = 3\text{ bis }5\text{ h}^{-1}$ (6:00 bis 23:00 Uhr), s. Tagesprofile in Tabelle 4	Je nach Raum- und Belegungssituation
Steuerung Sonnenschutz abhängig von der Grenzbestrahlungsstärke I_{grenz}	Nordost, Nordwest: $I_{\text{grenz}} \geq 200\text{ W/m}^2$ Alle anderen Orientierungen: $I_{\text{grenz}} \geq 300\text{ W/m}^2$	DIN 4108-2
Aktive Kühlung	Nicht vorhanden	
Lüftungsgerät	Nicht vorhanden	

Interne Wärmequellen

Nach DIN 4108-2 werden für thermische Simulationen alle interne Wärmelasten, verursacht durch Personen, elektronische Geräte und künstliche Beleuchtung, durch eine einzelne Wärmequelle mit einer Wärmeabgabe von 4,167 W/m² bzw. 100 Wh/(m²d) Dauerlast ersetzt. Dieser Wert wird vereinfacht für jeden Tag im Jahr angesetzt. Da im Rahmen der vorliegenden Studie verschiedene Nutzungsszenarien wie z. B. Homeoffice untersucht werden, wird hier von dieser Norm abgewichen und detaillierte Tagesprofile werden für die jeweiligen Wärmequellen und Nutzungsszenarien entwickelt, siehe Tabelle 3. So können zwei unterschiedliche, realitätsnähere Belegungszenarien berücksichtigt werden.

- Szenario 1: Person arbeitet tagsüber außer Haus. Dieses Szenario wird weiterhin als „Normal“ oder Standard definiert.
- Szenario 2: Person arbeitet im Homeoffice.

Die Tagesprofile werden nach Belegungsplänen im Anhang C Teil B.8 der DIN 16798 entwickelt.

Tabelle 3: Tagesprofile für interne Lasten nach Szenario „Normal“ und „Homeoffice“



Die in Tabelle 3 dargestellten Tagesprofile für die internen Lasten werden jeweils nach Wärmeabgaben von Personen, elektronischen Geräten und Beleuchtung differenziert. Zudem werden vier mögliche Tagesprofile berücksichtigt: Werktag-Standard, Wochenende-Standard, Werktag-Home-Office und Wochenende-Home-Office. Die entstehenden Lastprofile werden für die vier genannten Szenarien mit ihrer Verteilung über 24 Stunden und einer prozentualen Angabe von 0 % bis 100 % abgebildet.

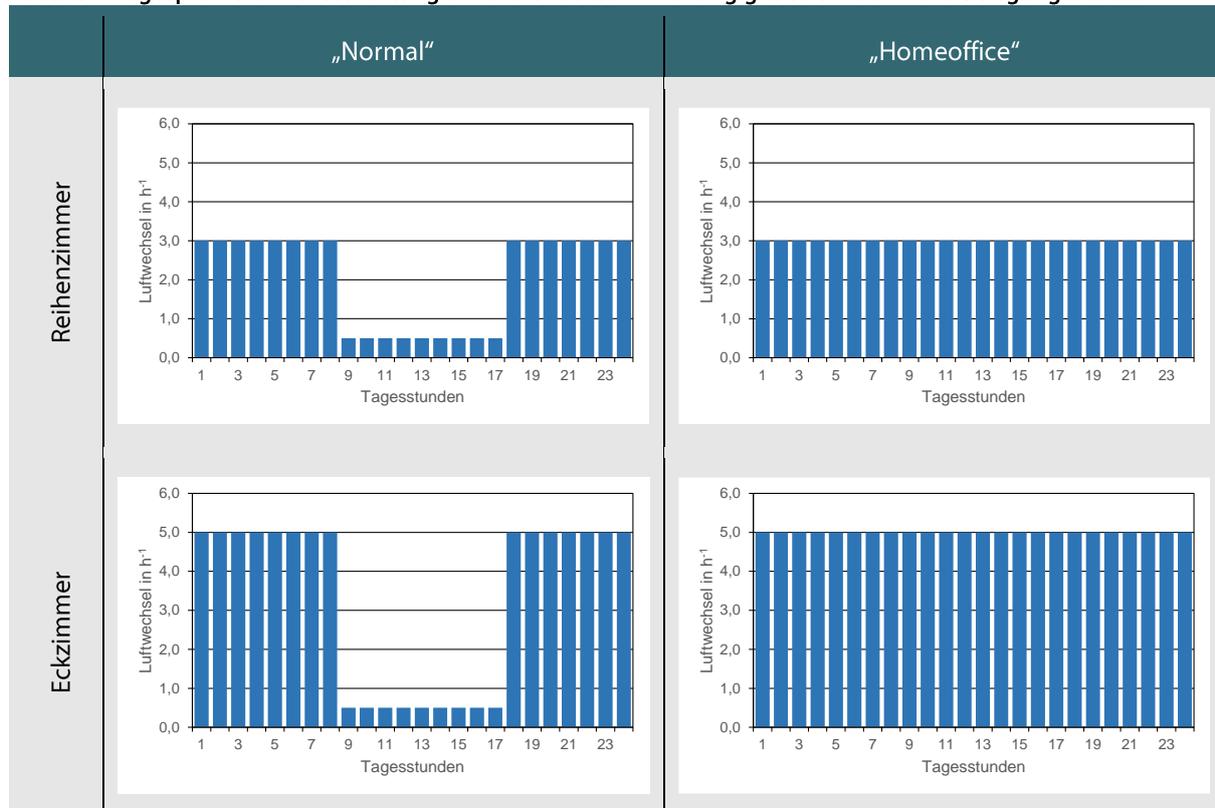
Für das Personenbelegungsprofil wird von einer Person im Raum ausgegangen, wobei die Wärmeabgabe einer Person u. a. von ihrer Aktivität abhängig ist. Für eine Person bei einer sitzenden Tätigkeit (z. B. Büroarbeit) wird ein Energieumsatz von 70 W/m² bzw. 1,2 met angenommen (DIN EN ISO 7730:2006-05). Für eine schlafende Person kann eine reduzierte Wärmeabgabe von etwa 41 W/m² bzw. 0,7 met angesetzt werden (Frank (1975) zitiert nach Krause et al., (2021)).

Das interne Lastprofil für die Beleuchtung wird in der Simulation abhängig von der Anwesenheit der Nutzer (bzw. vom Tagesprofil für Beleuchtung) gesteuert.

Luftwechsel und Fensterlüftung

Der Grundluftwechsel beträgt 0,5 h⁻¹ was dem hygienischen Mindestluftwechsel entspricht. Darüber hinaus kann der Luftwechsel je nach Belegungssituation (Fensteröffnung durch Nutzer) und Raumsituation (Möglichkeit zur Querlüftung) auf bis zu 5 h⁻¹ erhöht werden. Der Luftwechsel über Fensterlüftung durch den Nutzer ist tagsüber zudem abhängig von der Außen- und Innenraumlufttemperatur. Hierbei wird ein höherer Luftwechsel angesetzt (s. Tagesprofil), wenn die Innenraumlufttemperatur 23 °C überschreitet und über der Außenlufttemperatur liegt (DIN 4108-2:2013-02).

Tabelle 4: Tagesprofile für Fensterlüftung bzw. Luftwechsel in Abhängigkeit der Raum- und Belegungssituation



Aus diesen Annahmen ergeben sich die in Tabelle 4 dargestellten Luftwechselraten. In der Tabelle ist der Luftwechsel sowohl für die normale als auch für die Homeoffice Belegung jeweils für das Reihen- und das Eckzimmer für den Verlauf von 24 Stunden abgebildet. Der Luftwechsel für die normale Belegung in einem

Reihenzimmer liegt in den Stunden von 0 Uhr bis 8 Uhr, sowie von 18 Uhr bis 0 Uhr bei $3,0 \text{ h}^{-1}$ und in der Zeit von 9 Uhr bis 17 Uhr bei $0,5 \text{ h}^{-1}$. Für die normale Belegung in einem Eckzimmer liegt der Luftwechsel in dem erst genannten Zeitraum, dementsprechend während der Anwesenheit des Nutzers, bei $5,0 \text{ h}^{-1}$ und für den Zeitraum der Abwesenheit des Nutzers von 9 Uhr bis 17 Uhr wiederum bei $0,5 \text{ h}^{-1}$. Für die Homeoffice Belegung im Reihenzimmer liegt der Luftwechsel ganztägig bei $3,0 \text{ h}^{-1}$ und im Eckzimmer ganztägig bei $5,0 \text{ h}^{-1}$. Damit wird ein Szenario gewählt, das realistische höhere sommerliche Luftwechselraten zulässt.

Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz

Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) stellt Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz für Neubauten (GEG § 14) oder für Erweiterungen bestehender Gebäude größer als 50 m^2 (GEG § 51). Um angemessene thermische Bedingungen zu erreichen, verweist GEG § 14 auf die bestehenden Anforderungen in der DIN 4108-2:2013 Abschnitt 8, siehe Kap. 6. Von den beiden in dieser Norm anerkannten Bewertungsmethoden stützt sich das vorliegende Forschungsprojekt auf das thermische Simulationsverfahren.

DIN 4108-2:2013-02

Die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes erfolgt über die Bestimmung der Übertemperaturgradstunden im Jahr nach DIN 4108-2:2013-02.

Tabelle 5: Bezugswerte und Anforderungswerte für den sommerlichen Wärmeschutz (DIN 4108-2)

Sommerklimaregion	Bezugswert $\theta_{b,op}$ der operativen Innentemperatur	Anforderungswert Übertemperaturgradstunden
A	25 °C	1200 Kh/a (Wohnnutzung) 500 Kh/a (Büronutzung) für A, B und C
B	26 °C	
C	27 °C	

Die Übertemperaturgradstunden werden nach Ottel (1974) und Kolmetz (1996) über Gleichung 1 berechnet:

$$Gh_{\theta_{b,op}} = \sum_{i=1}^{t_{sim}} (\theta_{op} - \theta_{b,op}) \cdot 1h \quad (1)$$

Dabei sind

$Gh_{\theta_{b,op}}$	Übertemperaturgradstunden in Kh/a
t_{sim}	Simulationszeit in h, hier: 8760 h
θ_{op}	Berechnete operative Innentemperatur in °C
$\theta_{b,op}$	Bezugswert der operativen Innentemperatur in °C

Sommerlicher Komfort

Ausgehend von der Norm zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit, der DIN EN ISO 7730:2006-05 werden im Folgenden normative Anforderungen an die sommerliche Behaglichkeit in Innenräumen formuliert. Des Weiteren werden grundlegende Anforderungen und wesentliche Unterschiede diskutiert.

DIN EN 15251:2012-12

Neben der Bewertung von Parametern für die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden bietet diese Norm auch Leitlinien für die Erreichung von akustischem, visuellem, lufthygienischem und thermischem Komfort. Die Norm bezieht sich auf die bestehenden Komfortkategorien der DIN EN ISO 7730:2006-05 und bietet eine Einstufung entsprechend den Nutzererwartungen. Die Norm empfiehlt ausdrücklich die Kategorie II als Grundlage für jede Gebäudeplanung.

Kategorie	Beschreibung
I	hohes Maß an Erwartungen; empfohlen für Räume, in denen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten, z. B. Personen mit Behinderungen, kranke Personen, sehr kleine Kinder und ältere Personen
II	normales Maß an Erwartungen; empfohlen für neue und renovierte Gebäude
III	annehmbares, moderates Maß an Erwartungen; kann bei bestehenden Gebäuden angewendet werden
IV	Werte außerhalb der oben genannten Kategorien. Diese Kategorie sollte nur für einen begrenzten Teil des Jahres angewendet werden

Abbildung 25: Beschreibung der Anwendbarkeit der Kategorien zur Auslegung des Raumklimas (DIN EN 15251)

Unterhalb von 16 °C Außentemperatur (θ_e) beträgt die Komfortraumtemperatur ($\theta_{Ra,c}$) im Innenraum 22 °C und oberhalb von 32 °C Außentemperatur beträgt die Komforttemperatur 26 °C. Dazwischen lässt sich die Komforttemperatur in Abhängigkeit von der aktuellen Außentemperatur anhand Gleichung 2 berechnen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die Raumnutzer ihre Bekleidung und somit ihren clo Wert (Definition siehe DIN EN ISO 7730:2006-05) in Abhängigkeit ihrer individuellen thermischen Präferenzen anpassen können.

$$\theta_{Ra,c} = 18 \text{ °C} + 0,25 \times \theta_e \quad (2)$$

Die operative Raumtemperatur (θ_{Ra}) liegt im Bereich von ± 2 K der Komfortraumtemperatur ($\theta_{Ra,c}$).

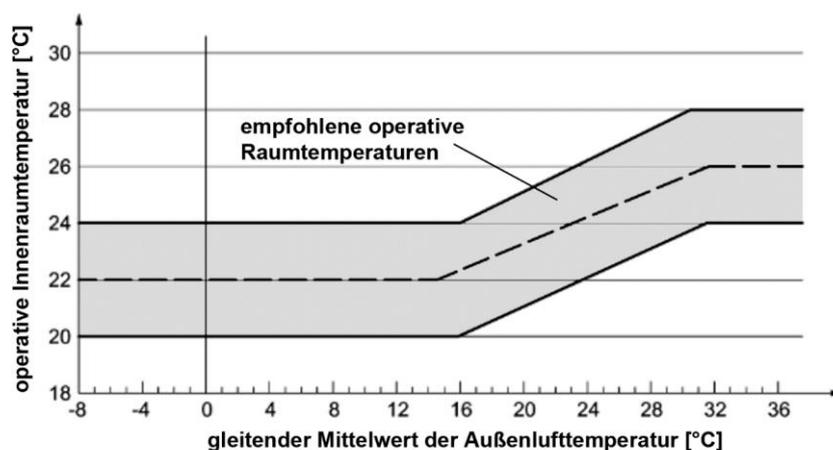


Abbildung 26: Empfohlene operative Innenraumtemperatur [°C] in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außenlufttemperatur [°C] entsprechend der Vorgaben der DIN EN 15251

Auf diese Weise wird die Behaglichkeitsklasse II für Wohngebäude in einem Temperaturbereich zwischen 20 °C und 26 °C festgelegt. Diese Werte werden für verschiedene Gebäudenutzungen (u.a. Wohngebäude) definiert.

Im Nationalen Anhang (NA) der Norm, Abschnitt 3.2.3 sind ebenfalls zulässige Abweichungen auf der Grundlage der Definition der Übertemperaturgradstunden festgelegt. Eine Abweichung von weniger als 1 % der gesamten Nutzungszeit muss nachgewiesen werden, um die entsprechende Behaglichkeitskategorie zu erhalten.

Um Empfehlungen zur thermischen Behaglichkeit in ungekühlten Gebäuden abgeben zu können, wird das Behaglichkeitsband angepasst. Gebäude ohne Kühlsysteme werden im Sommer und in den Übergangszeiten im Frühling und Herbst mit einem adaptiven Komfortband bewertet. Dieses Band umfasst die verschiedenen zuvor genannten Komfortkategorien. Ein wesentlicher Unterschied ist jedoch, dass in diesem Fall die Behaglichkeitstemperaturen mit dem "gleitenden Mittelwert" der Außentemperatur gepaart sind.

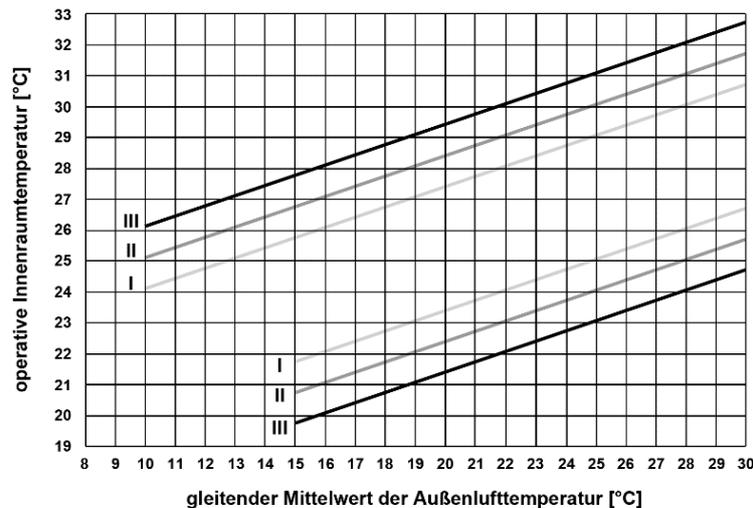


Abbildung 27: Auslegungswerte für operative Innentemperatur von Gebäuden ohne maschinelle Kühlanlage DIN EN 15251

Für die Kategorie II gelten die Gleichungen (3) und (4) zur Berechnung des oberen und des unteren Grenzwertes der operativen Raumtemperatur θ_o in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur θ_m .

$$\text{Oberer Grenzwert } \theta_{i \max} = 0,33 \times \theta_{rm} + 18,8 + 3 \quad (3)$$

$$\text{Unterer Grenzwert } \theta_{i \max} = 0,33 \times \theta_{rm} + 18,8 - 3 \quad (4)$$

Mindestanforderungen an die thermische Behaglichkeit in ungekühlten Gebäuden finden sich in DIN EN 15251 - Anhang G. In dieser Norm wird ein Maximum von 3 % oder 5 % der Nutzungsstunden festgelegt, in denen das Behaglichkeitsband um ein Delta < 2 K unter- bzw. überschritten werden kann. Für die Werte, die über der oberen Schwelle des Behaglichkeitsbandes liegen, ist der Begriff Übertemperaturhäufigkeit oder Übertemperaturstunden (ÜTS) zu verwenden. Wenn die ÜTS mit der "Überschreitungsmenge" multipliziert werden, ist die Definition Übertemperaturgradstunden zu verwenden.

DIN EN 16798-1:2022-03

Seit 2019 tritt die Norm Energetische Bewertung von Gebäuden- Lüftung von Gebäuden -Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität Temperatur, Licht und Akustik - DIN EN 16798-1 an die Stelle der DIN EN 15251.

Die neueste Ausgabe dieser Norm vom März 2022 weist einen wesentlichen Unterschied zur DIN EN 15251 auf. Früher wurde der nationale Anhang als informatives Dokument vorgelegt, während er jetzt gültig ist. Für die thermische Behaglichkeit hat diese Änderung erhebliche Auswirkungen, da im Abschnitt NA.1 ausdrücklich festgestellt wird:

„In diesem Anhang wird bei der Bewertung behaglichkeitsrelevanter Parameter nicht zwischen maschineller und freier Kühlung unterschieden.“

Mit dieser Änderung wird über die Norm nur noch die zulässige Abweichung von 1 % des ÜTGS der Gesamtnutzungsstunden zugelassen und keine der Übertemperaturwerte darf ein Delta größer als 2 K aufweisen, um in die Behaglichkeitskategorie II eingestuft zu werden, unabhängig von der geplanten Lösung zur Kühlung. Diese Maßnahme bewertet Projekte, die bewusst auf den Einsatz von Kühlsystemen verzichten, bis zu einem gewissen Grad ungerecht.

Allerdings ist auch die EN 16798-1 Teil des Dokuments und das adaptive Behaglichkeitsband für Gebäude ohne Kühlsysteme ist nach wie vor in Anhang B enthalten, mit den gleichen Grenzen pro Behaglichkeitskategorie, die in der früheren Norm (DIN EN 15251) festgelegt wurden. Es fehlen jedoch in der DIN EN 16798 weitere Anhänge, die die zulässigen Abweichungen vom adaptiven Behaglichkeitsband festlegen. Es könnte sein, dass solche wichtigen Bewertungen für Gebäude ohne mechanische Kühlung in Arbeit sind und in weitere Versionen der Norm aufgenommen werden. Weitere zugehörige Informationen sowie die für die Studie gewählten Bewertungsparameter werden an nachfolgender Stelle erläutert.

Weil die in der vorliegenden Studie angenommenen Randbedingungen für die Berechnung des sommerlichen Wärmeschutzes von der DIN 4108-2 abweichen (z. B. Annahmen für interne Lasten, detaillierte und differenzierte Belegungsprofile, Lüftung etc.), erscheint es nicht mehr sinnvoll, den Anforderungswert von 1200 Kh/a heranzuziehen. Die Berechnung der Überhitzungsstunden erfolgt daher nach den in DIN EN 16798-1:2022-03 beschriebenen Standardwerten für zulässige Innentemperaturen für Gebäude ohne maschinelle Kühlanlagen. Für diese Studie bestimmt die Komfortkategorie II ($-0,05 < PMV < + 0,05$, *Predicted Mean Vote* siehe DIN EN ISO 7730:2006-05) die Ober- und Untergrenzen für den thermischen Komfort in den simulierten Räumen. Da die zulässigen Abweichungen bezüglich der jährlichen Überhitzungsstunden in dieser Norm nicht festgelegt sind, werden die in der früheren DIN 15251 Anhang G angegebenen Werte als Referenz für die Festlegung eines angemessenen Grenzwertes herangezogen.

Anforderungen an den winterlichen Wärmeschutz

Die Anforderungen an den Mindestwärmeschutz nach der DIN 4108-2 und die Anforderungen im GEG an Wohngebäude (Einhaltung von H'_{τ} , Referenz-Außenwand: U-Wert $\leq 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) werden für alle untersuchten Bauteilvarianten eingehalten. Für die U-Werte wurden übliche Werte angenommen (siehe Tabellen 6 bis 8).

Bauteilaufbauten

Für die Untersuchung der Konstruktionen mit unterschiedlichen Rohdichten wurden neben den Außenwänden auch weitere raumumschließende Bauteile wie Innenwände und Innendecken definiert. Eine Übersicht aller relevanten Bauteile mit Materialkennwerten findet sich in Tabelle 6 bis Tabelle 8.

Zusammengefasst werden vier unterschiedliche Außenwandkonstruktionen mit geringer bis hoher Rohdichte untersucht, wobei die Rohdichteklassen (RDK) einen typischen Bereich abdecken, der mit Massivkonstruktionen erreicht wird. Die Angaben in kg/m^3 weisen auf die Rohdichten dieser Massivkonstruktionen hin:

- AW0 Holzrahmenbauweise ohne Angabe einer Rohdichteklasse
- AW1 Wärmedämmziegel RDK = 600 [kg/m^3]
- AW2 Hochlochziegel RDK = 1200 [kg/m^3]
- AW3 Kalksandstein RDK = 1800 [kg/m^3]

Die Varianten AW2 und AW3 werden als zweischalige Außenwände ausgeführt. Dabei wirkt die außenliegende Schale aus einem Wärmedämmziegel (z. B. Poroton-WDF-180) ähnlich wie bei einem WDVS und die innenliegende tragende Wandschale mit einer Rohdichteklasse (RDK) von 1,2 respektive 1,8 fungiert als Wärmespeicher.

Als Geschossdeckenvariante wurde neben einer typischen Stahlbetondecke eine Massivholzdecke mit einer geringeren flächenbezogenen wirksamen Wärmekapazität definiert. Eine relativ hohe Wärmespeicherfähigkeit des Stahlbetons ist ausschlaggebend für den sommerlichen Wärmeschutz im Vergleich zu den Außenwänden, wobei die wirksame Speicherfähigkeit durch Trittschalldämmung und Bodenaufbau mit einer gewissen thermischen Abkopplung der Stahlbetondecke vermindert wird. Zudem erscheint es jedoch sinnvoll, eine zukünftige Alternative für den Geschosswohnungsbau zu verwenden und hierbei bietet sich eine Massivholzdecke als Alternative zu Bauteilen mit CO₂-intensiven Produktionsprozessen als ökologisch und ökonomisch sinnvoll an.

Tabelle 6: Außenwandaufbauten (von außen nach innen)

	Material	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Rohdichte [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität [J/(kgK)]	U-Wert [W/(m ² K)]
AW0						0,18
	Außenwandverkleidung (Holz Lärche)	0,024	0,155	600	1600	
	Holz Fichte Lattung versetzt (30/50; 30/80)-Hinterlüftung	0,03	0,12	450	1600	
	MDF	0,015	0,14	600	1700	
	Konstruktionsholz	0,22	0,12	600	1100	
	Mineralwolle	0,22	0,04	33	1030	
	Dampfbremse	-	-	1000	-	
	Gipsfaserplatte	0,015	0,32	1000	1003	
AW1						0,17
	Kalkzementputz	0,02	0,87	1800	1000	
	Wärmedämmziegel (ThermoPlan S75)	0,425	0,075	600	1000	
	Gipsputz	0,01	0,7	1400	1000	
AW2						0,25
	Kalkzementputz	0,02	0,87	1800	1000	
	Poroton-WDF-180	0,18	0,055	400	1000	
	Hochlochziegel 1,2	0,24	0,5	1200	1000	
	Gipsputz	0,01	0,7	1400	1000	
AW3						0,27
	Kalkzementputz	0,02	0,87	1800	1000	
	Poroton-WDF-180	0,18	0,055	400	1000	
	Kalksandstein	0,175	1	1800	1000	
	Gipsputz	0,01	0,7	1400	1000	

Tabelle 7: Innenwandaufbauten

	Material	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Rohdichte [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität [J/(kgK)]
IWO	Gipskartonplatte	0,0125	0,25	800	1050
	Gipskartonplatte	0,0125	0,25	800	1050
	Konstruktionsholz (60/100) mit Holzfaserdämmung	0,1	0,039	45	1600
	Gipskartonplatte	0,0125	0,25	800	1050
	Gipskartonplatte	0,0125	0,25	800	1050
IW1	Gipsputz	0,01	0,7	1400	1000
	Hochlochziegel	0,175	0,58	1400	1000
	Gipsputz	0,01	0,7	1400	1000

Tabelle 8: Innendeckenaufbauten (von oben nach unten)

	Material	Dicke [m]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Rohdichte [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität [J/(kgK)]
IDO	Zementestrich	0,06	1,33	2000	1080
	Trennschicht	0,002	0,2	1400	1400
	Trittschalldämmung	0,03	0,035	68	1030
	Schüttung	0,06	0,7	1500	1000
	Rieselschutz	0,002	-		
	Brettsperrholz	0,15	0,13	500	1600
	Gipsfaserplatte	0,0125	0,32	1000	1100
ID1	Gipsputz	0,01	0,7	1400	1000
	Hochlochziegel	0,175	0,58	1400	1000
	Gipsputz	0,01	0,7	1400	1000

Variantenmatrix

Es war geplant, neben zwei typischen Wohngebäuden auch zwei typische Bürogebäude zu untersuchen. Eine Beschränkung auf die Untersuchungen an einem Mehrfamilienhaus unter Berücksichtigung verschiedener Nutzungsszenarien (Wohnen, Büro, Mischnutzung) ist jedoch ausreichend und wird im Folgenden erläutert.

Von besonderer Relevanz sind Varianten, die einen großen Nutzerkreis repräsentieren, bei Wohnnutzungen sind dies im wesentlichen Geschosswohnungsbauten. In Deutschland werden zwar nach wie vor insgesamt mehr Einfamilienhäuser gebaut als Mehrfamilienhäuser, dennoch ist Mehrfamilienhäusern eine höhere Relevanz zuzuschreiben, da sich der Großteil der Wohnungen und damit der Nutzer in Deutschland in Mehrfamilienhäusern befindet. Dies ist deutlich in Abbildung 28 erkennbar, welche die Anzahl der Wohnungen nach Gebäudetyp für das Jahr 2018 aufzeigt. Die Anzahl der Wohnungen in Gebäuden mit einer Wohnung liegt bei circa 13 Millionen und die Anzahl der Wohnungen in Gebäuden mit drei oder mehr Wohnungen bei circa 22 Millionen. Zudem können bei Einfamilienhäusern insbesondere nachts erheblich andere Luftwechselraten (Querlüftung) problemlos angenommen werden, die weit über die Angaben zum erhöhten Luftwechsel nach DIN 4108-2 hinausgehen (Gertis, 1984). Die hohen Luftwechselraten sind jedoch in Innenstädten aus Gründen des Lärmschutzes und des Einbruchschutzes nicht immer darstellbar.

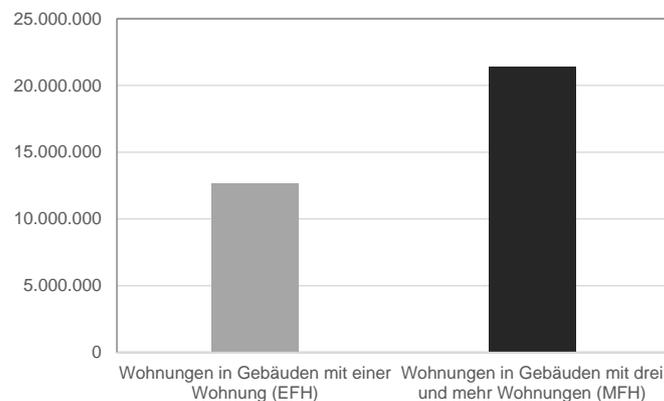


Abbildung 28: Anzahl der Wohnungen nach Gebäudetyp im Jahr 2018. Eigene Darstellung nach (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2021)

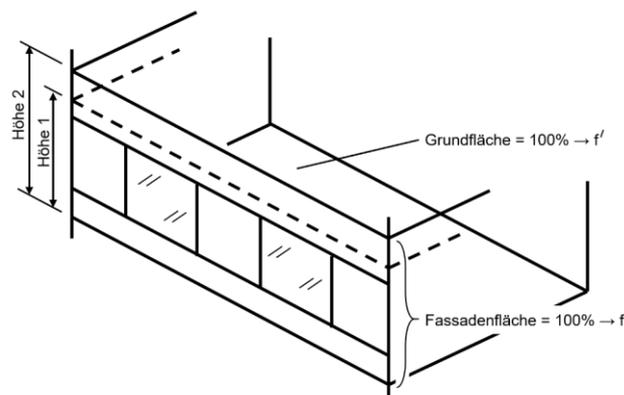
Im Vergleich zu Wohngebäuden werden viele moderne Bürogebäude größtenteils in Stahlbetonskelettbauweise mit vorgehängten Glasdoppelfassaden ausgestattet. Diese Art der Bauweise führt häufig zu hohen Kühllasten und eher ungünstigen gesamtenergetischen Energieverbräuchen (Maas et al., 2011). Im Gegensatz dazu wurden bereits deutlich effizientere Nicht-Wohngebäude mit Lochfassaden errichtet, u.a. nuoffice, München (www.nuoffice.de), die eine sehr ähnliche Struktur wie übliche Geschosswohngebäude aufweist. Somit kann eine Untersuchung zu Bauweisen mit höheren Rohdichten so ausgelegt werden, dass zukunftssträchtige Gebäudetypen wieder vermehrt Ähnlichkeiten zum Geschosswohnungsbau haben werden. Daher wird im Rahmen dieser Studie darauf verzichtet, Gebäude aus Stahlbeton und vorgehängten Glas-Fassaden näher zu untersuchen. Trotz struktureller Unterschiede lassen sich die Ergebnisse für einzelne Räume in Mehrfamilienhäusern in einem gewissen Maß auf Einfamilienhäuser und Bürogebäude übertragen. Entscheidend ist hierbei die Eindringtiefe bei Temperaturänderungen an den Oberflächen von Innenwänden und Decken. Da vielfach adiabate Zustände zum Nachbarraum angenommen werden können, hängen die Ergebnisse eher von der aktivierbaren Speichermasse (bis zur Mitte der Innenwand oder der Deckenunterseite) ab. Im Gegensatz dazu entstehen in Außenbauteilen unsymmetrische Temperaturverteilungen und zugehörige Wärmeverluste oder Wärmegewinne. Somit wird eine vernünftige Reduktion der Varianten erreicht, die Kernaussagen zu Bauweisen mit höheren Rohdichten erlaubt. Dennoch können weitere Varianten auch gezielt für bestimmte Nicht-Wohnungsbautypen in nachfolgenden Studien wichtige Erkenntnisse erbringen.

Zur Durchführung der Parameterstudie wurde eine initiale Variantenmatrix erstellt, welche in Abbildung 29 dargestellt ist. Diese beinhaltet sämtliche Varianten, die im Rahmen der Studie anhand einer Simulation bezüglich des sommerlichen Wärmeschutzes bewertet werden sollten. Neben den bereits beschriebenen Parametern, der Referenzräume, der Standorte und der Klimaszenarien sowie der Bauweise der Außenwände, Innenwände und der Geschossdecke wurden weitere Gestaltungsparameter berücksichtigt. Hierbei handelt es sich um die Geschosshöhe, die Orientierung, den Fensterflächenanteil sowie die Fensterart. In Summe ergaben sich somit 10.368 zu simulierende Varianten.

Parameter	Varianten				Anzahl
Referenzräume	Reihenzimmer (RZ) ($n_L = 3 \text{ h}^{-1}$)		Eckzimmer (EZ) ($n_L = 5 \text{ h}^{-1}$)		2
Standort	Rostock	Potsdam		Mannheim	3
Geschosshöhe	2.40 m		2.80 m		3
Orientierungen	NO	NW	SO	SW	4
Fensterflächenanteil f'	12 %		25 %		3
Verglasung	Normalverglasung ohne Sonnenschutz		Sonnenschutzglas		3
Außenwand	AW0 (Holz)	AW1 (WDZ) $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$	AW2 (HLZ) $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$	AW3 (KS) $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$	4
Geschossdecke	Holzdecke		Stahlbetondecke		2
Wetterdatensatz	Gegenwart		Zukunft		2
	Gesamt				10368

Abbildung 29: Initiale Variantenmatrix

Man beachte hierbei, dass der Fensterflächenanteil (f) nicht wie sonst üblich als Anteil der Fensterfläche zur gesamten Fassadenfläche angegeben wird. Normalerweise werden bei einem Fensterflächenanteil von 30 % insgesamt 70 % opake Bauteile in einer Fassade vorhanden sein. Damit der Einfluss der Raumhöhe sinnvoll berücksichtigt und variiert werden kann, ohne dass sich gleichzeitig der Fensterflächenanteil ändert, wird hier ein abgewandelter Fensterflächenanteil (f') verwendet, der auf die Grundfläche des zugehörigen Raumes bezogen wird. Somit lassen sich dann in Folge Raumhöhen variieren, ohne dass sich der Fensterflächenanteil (f') mit verändert und mehrere Abhängigkeiten bei der Variation eines einzelnen Parameters entstehen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 30 dargestellt und diese Art des Bezugs des Fensterflächenanteils auf die Grundfläche, wird auch seit längerem z.B. in DIN 4108-2:2013-02 verwendet und dort mit f_{WG} bezeichnet.

Abbildung 30: Erläuterungen zum grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil f' . Bei einer Veränderung der Raumhöhe bleibt f' konstant, wenn die Fensterhöhe nicht verändert wird im Gegensatz zum üblichen fassadenflächenbezogenen Wert f .

Basisvarianten

Infolge einer grundlegenden Überprüfung erscheint es durch lange Simulationslaufzeiten nicht sinnvoll, sämtliche Varianten zu simulieren. Daher wird ein iteratives Vorgehen angewandt und die Variantenmatrix so gekürzt, dass zunächst nur Basisvarianten berechnet werden müssen. Dabei werden diejenigen Varianten ausgeschlossen, deren Parameter-Kombination keine sinnvollen Erkenntnisgewinne zur Folge hätte, das zugehörige Verfahren wird dokumentiert. Zur Durchführung der ersten Simulationsreihe wird somit lediglich ein Eckzimmer am Standort Potsdam in der Gegenwart berücksichtigt. Die Raumhöhe, die Fensterart, die Bauweise der Innenwände und der Geschossdecke werden dagegen weiterhin in allen Varianten betrachtet. Lediglich der Anteil der Fensterfläche an der Fassadenfläche wird mit 25 % berücksichtigt und die Orientierungen Süd/West und Nord/Ost werden berücksichtigt. Die entsprechenden Parameter die im ersten Durchlauf der Simulation berücksichtigt werden, sind in Abbildung 31 rot markiert.

Auf diese Weise kann die Anzahl der zu simulierenden Varianten deutlich reduziert werden. Bezüglich der Übertragbarkeit der Ergebnisse der Simulationen der Wohngebäude auch auf Büros oder Mischnutzungen sei auf folgende Kapitel verwiesen. Anhand dieser ersten Simulationsreihe können die Funktionalität der Simulationen geprüft und möglicherweise vorliegende Fehler behoben werden. Zudem können Parameterkombination identifiziert werden, die in Bezug auf die Zielstellung keinen Mehrwert liefern und damit wird die Variantenmatrix für die restlichen Simulationen angepasst.

Parameter	Varianten				Anzahl
Referenzräume	Reihenzimmer (RZ) ($n_t = 3 \text{ h}^{-1}$)		Eckzimmer (EZ) ($n_t = 5 \text{ h}^{-1}$)		1
Standort	Rostock	Potsdam		Mannheim	1
Geschosshöhe	2.40 m	2.80 m		3.20 m	3
Orientierungen	NO	NW	SO	SW	2
Fensterflächenanteil f'	12 %	25 %		34 %	1
Verglasung	Normalverglasung ohne Sonnenschutz	Sonnenschutzglas		Normalverglasung mit Sonnenschutz	3
Außenwand	AW0 (Holz)	AW1 (WDZ) $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$	AW2 (HLZ) $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$	AW3 (KS) $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$	4
Geschossdecke	Holzdecke		Stahlbetondecke		2
Wetterdatensatz	Gegenwart		Zukunft		1
	Gesamt				144

Abbildung 31: Basisvarianten für den ersten Durchlauf der Simulationsreihe

Somit wurde die Variantenmatrix neben den in der Zielstellung beschriebenen Eingangsgrößen (bspw. Bauweise, Wetterdatensatz) um eine Reihe von geometrischen Veränderungen ergänzt (bspw. Fensterflächengröße, Raumhöhe). Nach diesen ersten Anpassungen wurden weitere Parameter von Interesse aufgenommen, so dass aus den finalen Ergebnissen möglichst umfangreiche Erkenntnisse abgeleitet werden können.

Finale Variantenmatrix

Statt der ursprünglichen drei Varianten des Fensterflächenanteils (f') werden in der finalen Variantenmatrix fünf Varianten berücksichtigt. Zudem wurde der Parameter der Belegung hinsichtlich einer üblichen Wohnnutzung oder einer Nutzung im Homeoffice ergänzt. Dadurch entstand eine Erhöhung der Anzahl der Varianten auf 17.280.

Parameter	Varianten					Anzahl
Referenzräume	Reihenzimmer (RZ) ($n_L = 3 \text{ h}^{-1}$)		Eckzimmer (EZ) ($n_L = 5 \text{ h}^{-1}$)			2
Standort	Rostock	Potsdam		Mannheim		3
Geschosshöhe	2.40 m		2.80 m		3.20 m	3
Orientierungen	NO	NW	SO		SW	2
Fensterflächenanteil f'	12 %	18 %	25 %	30 %	34 %	5
Verglasung	Normalverglasung ohne Sonnenschutz		Sonnenschutzglas		Normalverglasung mit Sonnenschutz	3
Außenwand	AW0 (Holz)	AW1 (WDZ) $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$	AW2 (HLZ) $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$	AW3 (KS) $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$		4
Geschossdecke	Holzdecke		Stahlbetondecke			2
Wetterdatensatz	Gegenwart		Zukunft			2
Belegung	Normal		Home Office			2
					Gesamt	17280

Abbildung 32: Finale Variantenmatrix nach Ausschluss von Parametern (rot), die keine wesentlichen weiteren Erkenntnisse liefern.

Grundlagen der thermischen Simulation

Sämtliche Simulationen wurden mittels TRNLizard (Transsolar Software Engineering, 2017) durchgeführt, womit sich automatische Variationen der Eingabeparameter für thermische Simulationen mit TRNSYS über zusätzliche Skripte erzeugen lassen. Die Auswertungen aller Ergebnisdateien erfolgte danach über automatisierte Skripte mit Statistikfunktionen.

Zunächst wurden so genannte Box-Plots erzeugt, in denen die Ergebnisse sämtlicher Varianten als einzelne Punkte abgebildet werden. Des Weiteren werden oberes und unteres Quartil sowie der Median aller Ergebnisse als robuste statistische Größe in Form einer dicken Querlinie dargestellt. Der weniger aussagekräftige Mittelwert, der gegebenenfalls durch Ausreißer stark beeinflusst werden kann, wird zusätzlich als Kreis mit ausgegeben.

Für die Bewertung des winterlichen und des sommerlichen Verhaltens werden zwei Kriterien angegeben: Für den Winter wird der Heizenergiebedarf ohne Warmwasser in kWh/(m²a) berechnet und für den Sommer werden die Übertemperaturstunden angegeben mit Überschreitungsanteilen von 3 % bzw. 5 % der Stunden im Jahr, was normativ mit 259 h/a bzw. 432 h/a angegeben wird.

Während noch in DIN 4108-2:2013-02 mit Übertemperaturgradstunden und zugehörigen Grenzwerten für Wohnnutzungen 500 Kh/a und für Büronutzungen während der Nutzungszeiten von 1200 Kh/a argumentiert wurde, sind hier Übertemperaturstunden (gem. DIN EN 15251 bzw. DIN EN 16798-1) angegeben. Dies hat zwar den Nachteil, dass deutliche Überschreitungen nicht entsprechend der Größe der Überschreitung gewichtet werden, aber den Vorteil, dass die Gesamtdauer während der Nutzungszeit besser wiedergegeben werden kann. Die Grenzwerte für Wohnnutzungen liegen bei Überschreitungen von 259 h/a bzw. 432 h/a. Diese finden sich u.a. in der DIN EN 15251.

Auswertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation der 17.280 Varianten lassen sich nicht einfach grafisch oder tabellarisch darstellen. Als Lösung bieten sich die im Folgenden dargestellten Boxplot-Diagramme sowie die detaillierten Liniendiagramme an, welche sich in Anhang A – C befinden.

Winterlicher Wärmeschutz

Der Fokus dieses Forschungsprojektes liegt auf der Analyse des sommerlichen Wärmeschutzes, da der winterliche Wärmeschutz im Wesentlichen von der energetischen Qualität der Gebäudehülle ohne größeren Einfluss der Speichermassen abhängt. Die thermische Behaglichkeit in Innenräumen sollte jedoch unabhängig von der Jahreszeit gewährleistet werden, weswegen ebenfalls der Winterfall betrachtet wird. Stunden, in denen die Temperaturen unterhalb des in den Normen definierten Behaglichkeitsbandes liegen, werden als "Untertemperaturstunden" (UTS) bezeichnet.

Für den Winter sieht die DIN EN 16798-1 vor, dass das beschriebene adaptive Behaglichkeitsband nicht herangezogen werden soll. Stattdessen wird in Tabelle B.2 eine feste Mindesttemperatur von 20 °C (für die Behaglichkeitskategorie II) angegeben. Dieser Wert definiert den Sollwert der Heizungsanlage des vorliegenden Projektes. Die Anforderungen an die Bauteile zur Erreichung des Mindestwärmeschutzes werden eingehalten.

Simulationsergebnisse

Sämtliche in der Variantenmatrix aufgeführten Varianten werden im Folgenden in Bezug auf den winterlichen Wärmeschutz dargestellt. Dabei wird sowohl die Untertemperaturhäufigkeit als auch der Heizenergiebedarf berücksichtigt.

Untertemperaturhäufigkeit

Anhand der thermischen Simulation lässt sich feststellen, dass es bei keiner der Varianten Stunden der thermischen Unbehaglichkeit aufgrund von zu niedriger Innenraumtemperatur gibt. Tabelle 9 zeigt die für die repräsentativen Fälle erhaltenen Werte. Dieses Ergebnis ist offensichtlich, da die Simulation ein geeignetes Heizsystem beinhaltet.

Tabelle 9: Referenzfall (Eckzimmer mit einem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil f' von 18 %)

Variante	Untertemperaturstunden (UTS)
Leichtbauweise – ρ : 200 kg/m ³	0
Schwere Bauweise 01 – ρ : 600 kg/m ³	0
Schwere Bauweise 02 – ρ : 1200 kg/m ³	0
Schwere Bauweise 03 – ρ : 1800 kg/m ³	0

Heizenergiebedarf

Durch den standardmäßigen Einsatz von Heizsystemen kann die thermische Behaglichkeit im Winter gewährleistet werden. Der Energiebedarf des Heizsystems variiert jedoch stark in Abhängigkeit einzelner, in der Variantenmatrix definierter Parameter.

Die resultierenden Heizenergiebedarfsergebnisse für die gesamte parametrische Studie mit 17.280 Fällen werden nach den einzelnen modifizierten Parametern kategorisiert. Die Berechnungen berücksichtigen ein ideales Heizgerät und die Implementierung eines Luft-Wasser-Wärmepumpensystems, was über die nächsten Jahre oder Jahrzehnte als Standardfall angenommen wird. Die für die Warmwassererzeugung erforderliche Energie bleibt unberücksichtigt. Es ist zu beachten, dass die Ergebnisse von einzelnen Modellräumen und nicht von Simulationen ganzer Gebäude abgeleitet sind. Das Hochskalieren der Ergebnisse der Räume und der Vergleich mit ganzen Gebäuden ist daher nicht vollständig korrekt, da viele Faktoren und die angrenzenden Räume mit ihren jeweiligen Nutzungen in dieser Analyse nicht berücksichtigt werden. Die Ergebnisse sind dennoch belastbar, da sie den überwiegenden Teil der Nutzung gut repräsentieren.

In den folgenden Abbildungen 33 bis 44 ist der resultierende Heizenergiebedarf in $[\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})]$ jeweils einzeln in Abhängigkeit vom Fensterflächenanteil, dem Gesamtenergiedurchlassgrad der Fenster, der Verglasung, des Sonnenschutzes, der Raumhöhe, dem Aufbau der Außenwand, dem Aufbau der Innendecke, der Raumbelegung, der Raumorientierung, den Wetterdaten, der Lage des Zimmers sowie dem Gebäudestandort dargestellt. Alle Ergebnisse aus den Simulationsvarianten erscheinen als Punkte in den Box-Plots.

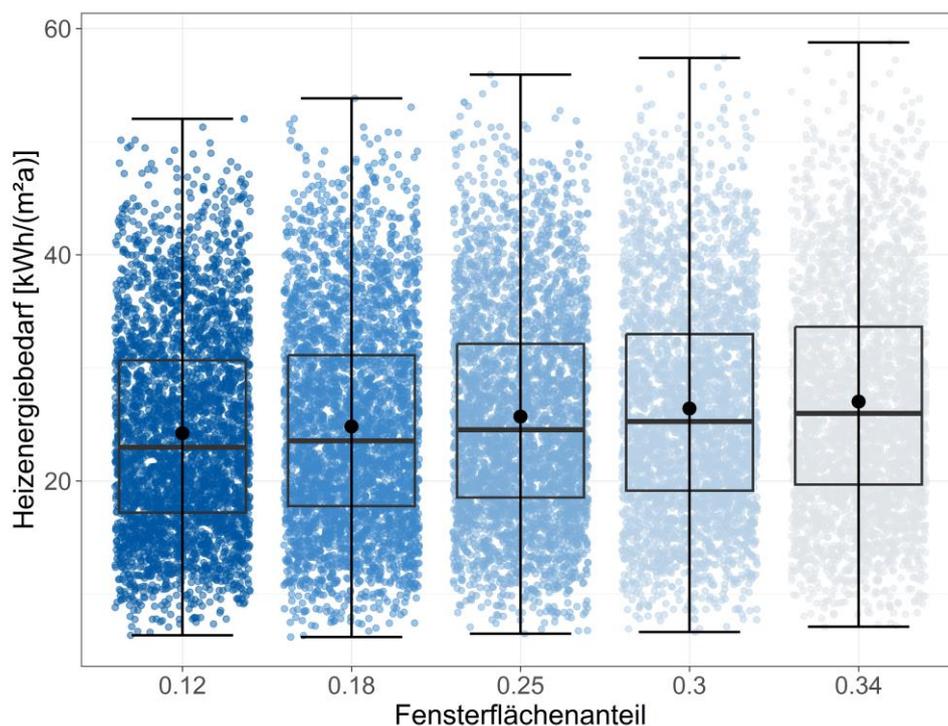


Abbildung 33: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit vom grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil f'

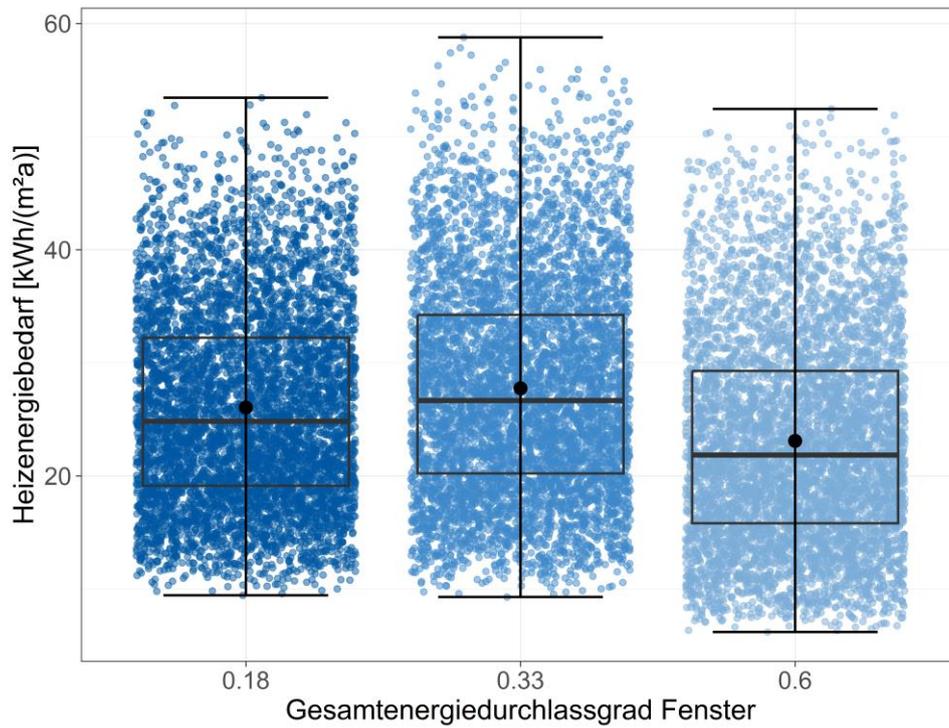


Abbildung 34: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit vom Gesamtenergiedurchlassgrad der Fenster

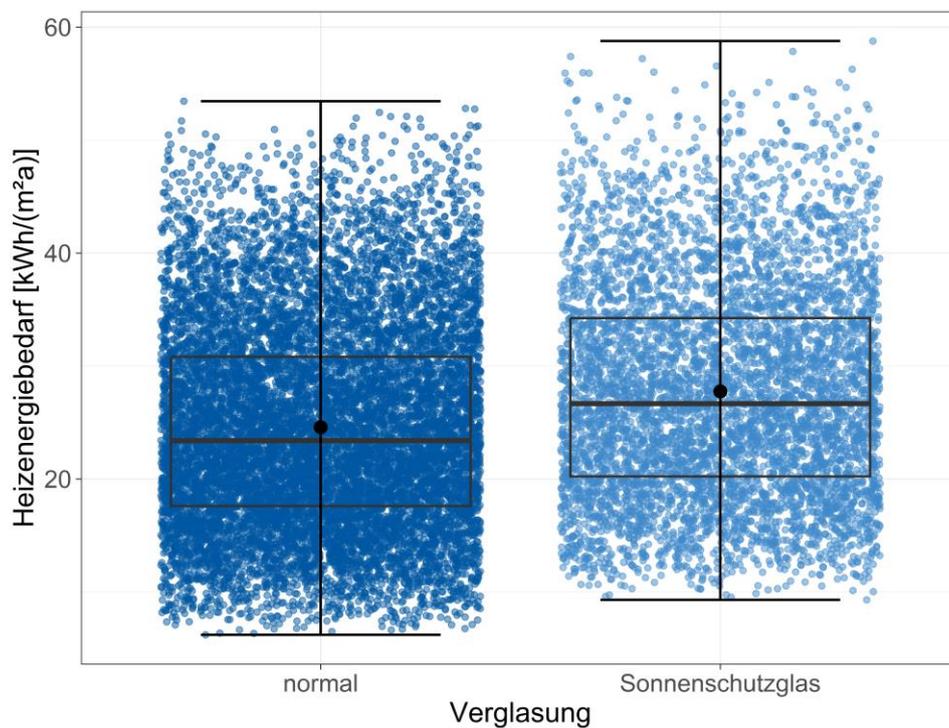


Abbildung 35: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit von der Verglasung

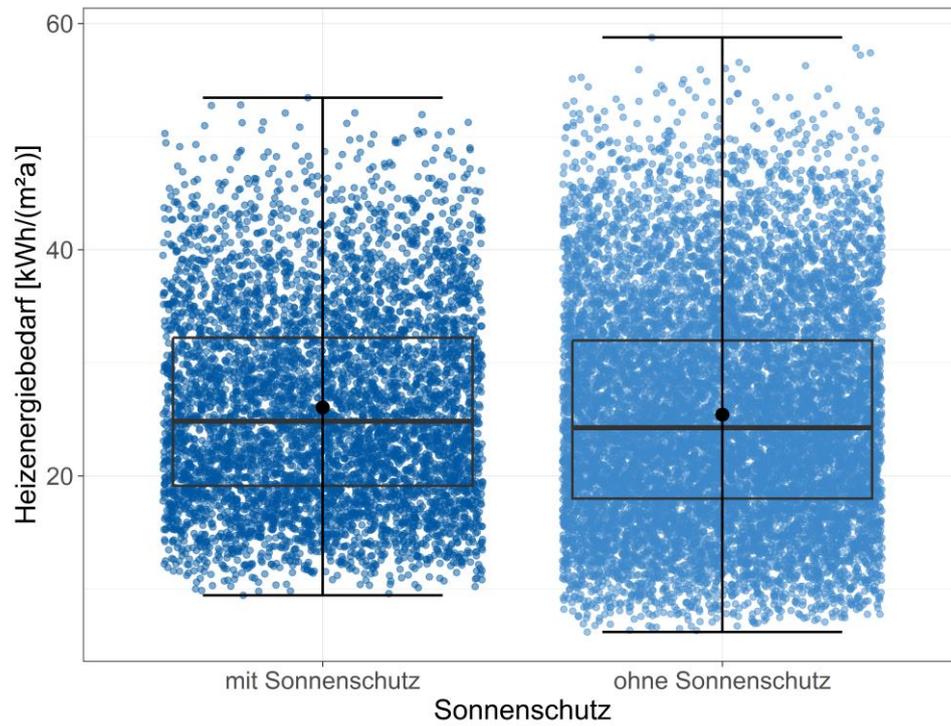


Abbildung 36: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit vom Sonnenschutz

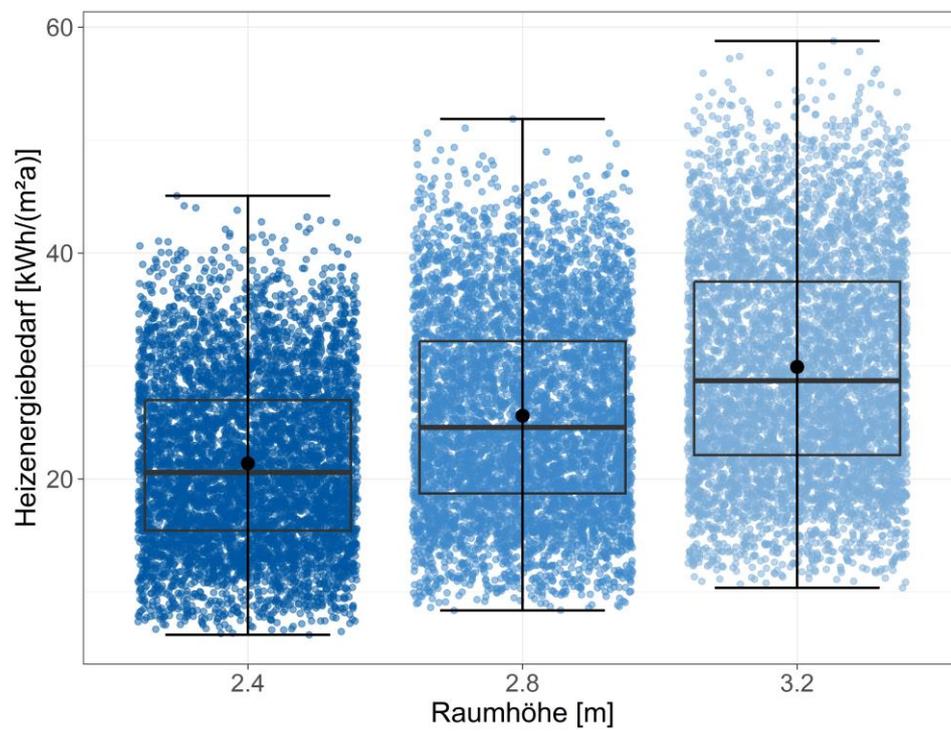


Abbildung 37: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit von der Raumhöhe

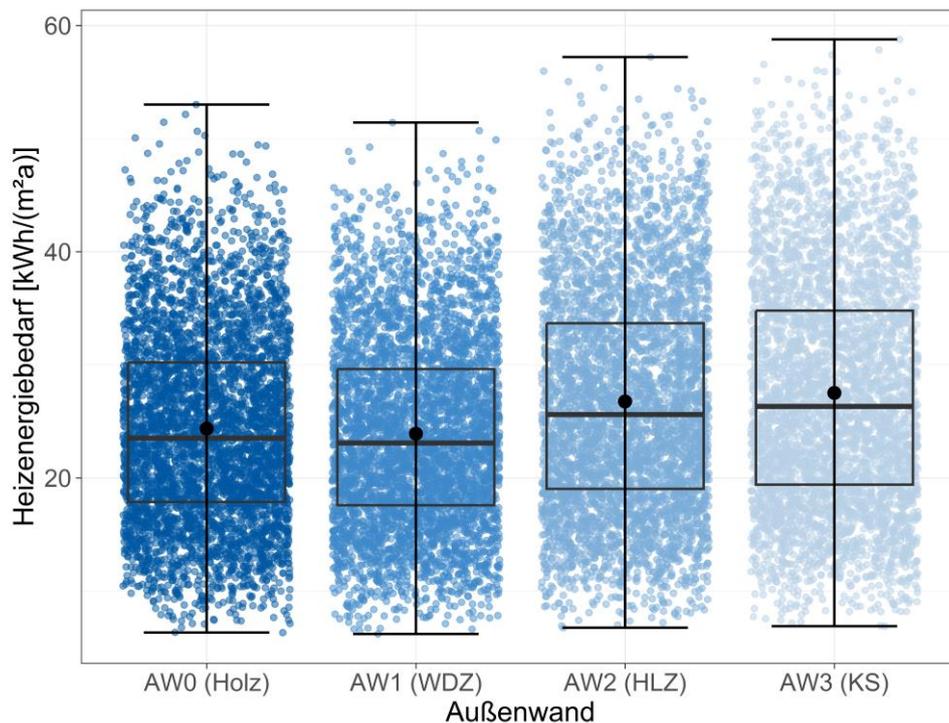


Abbildung 38: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit von den Außenwänden AW0 bis AW3.
 Hinweis: Für AW0 und AW1 sowie für AW2 und AW3 wurden leicht unterschiedliche U-Werte verwendet (siehe Tabellen 6 bis 8). Gleiche U-Werte ergeben für Geschosswohnungsbauten nahezu gleiche Heizenergieverbräuche unabhängig von der Art der Außenwände

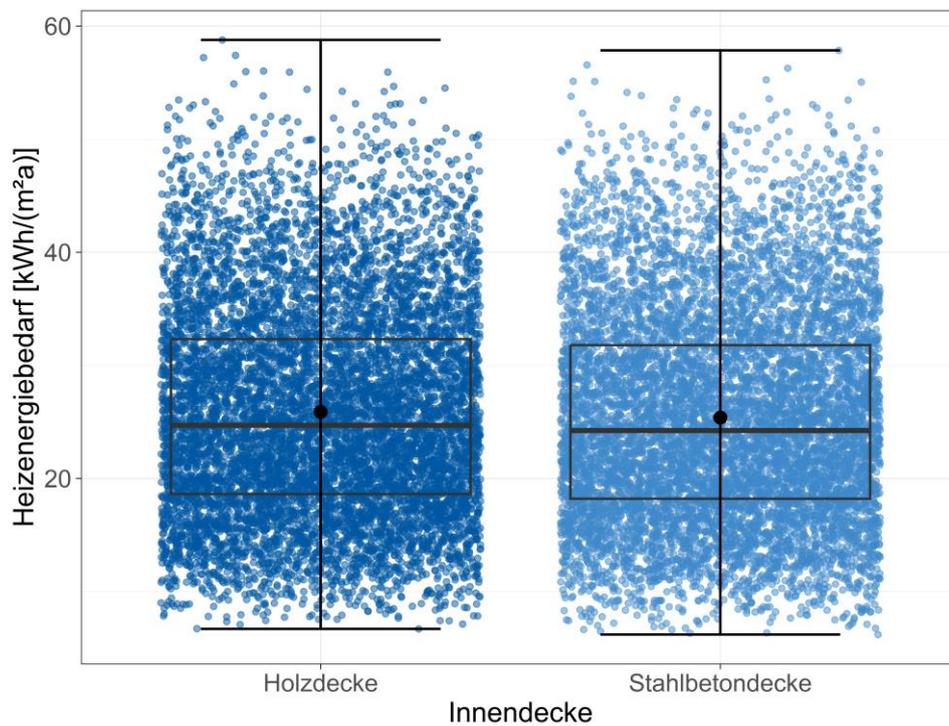


Abbildung 39: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit von der Innendecke

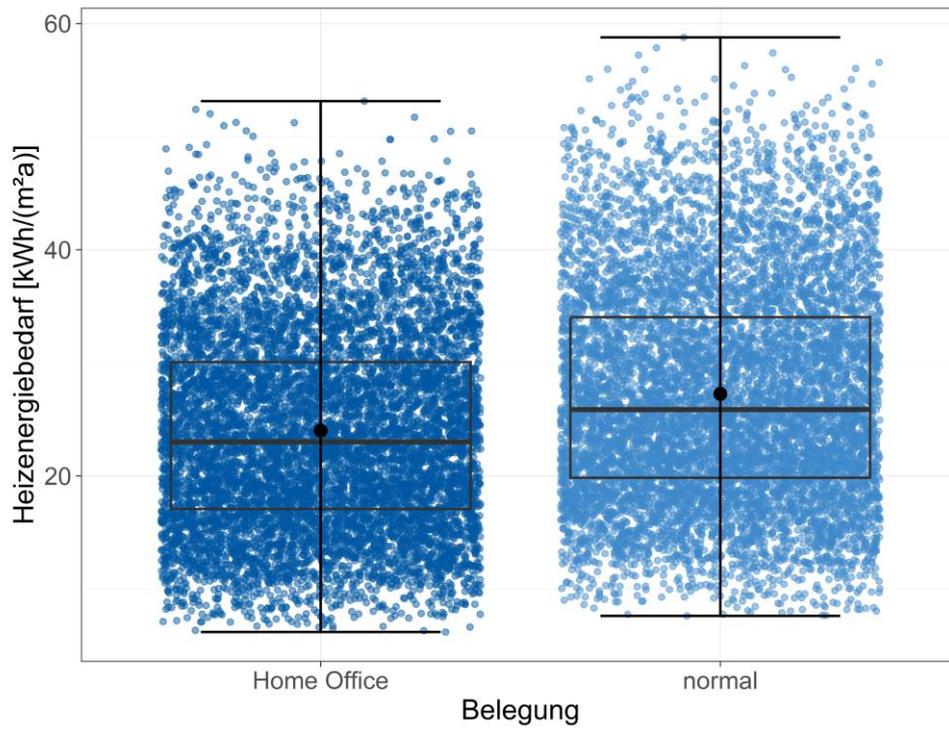


Abbildung 40: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit von der Belegung

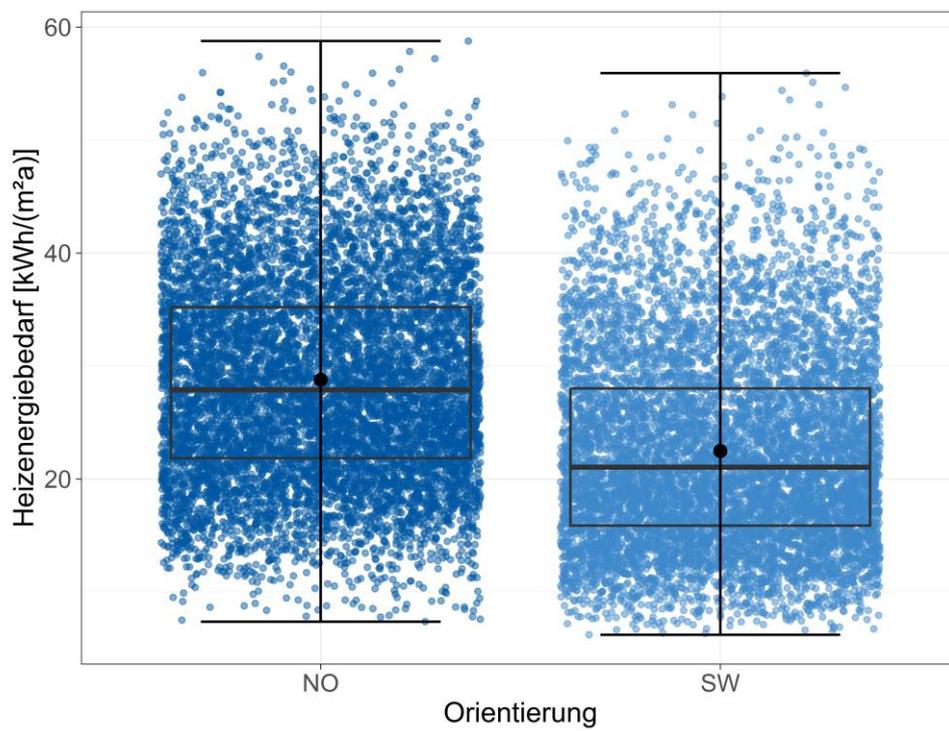


Abbildung 41: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit von der Orientierung

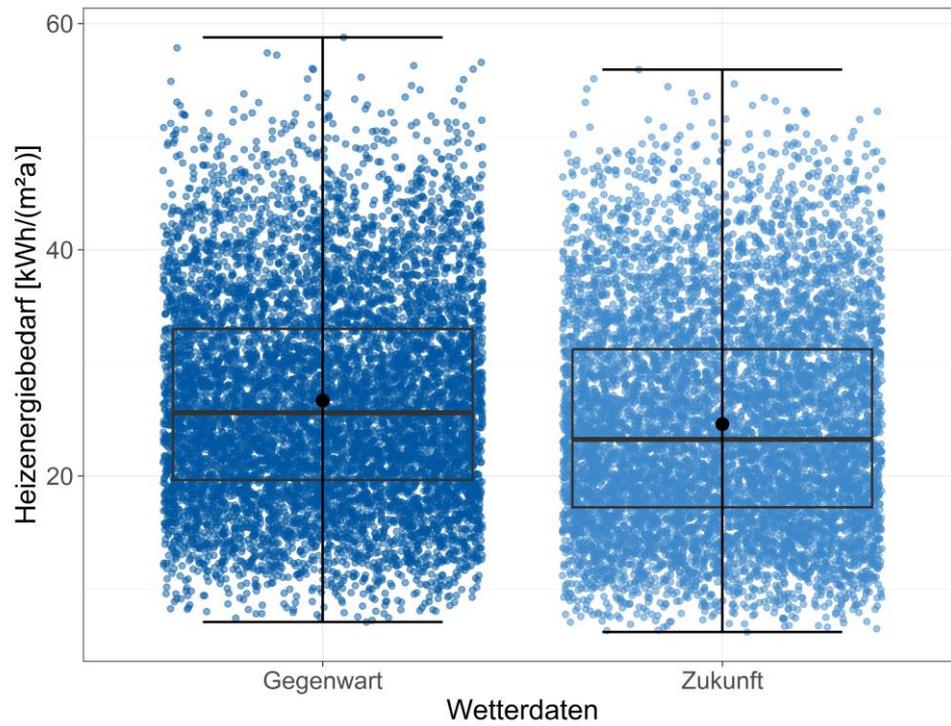


Abbildung 42: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit von den zugrundeliegenden Wetterdaten

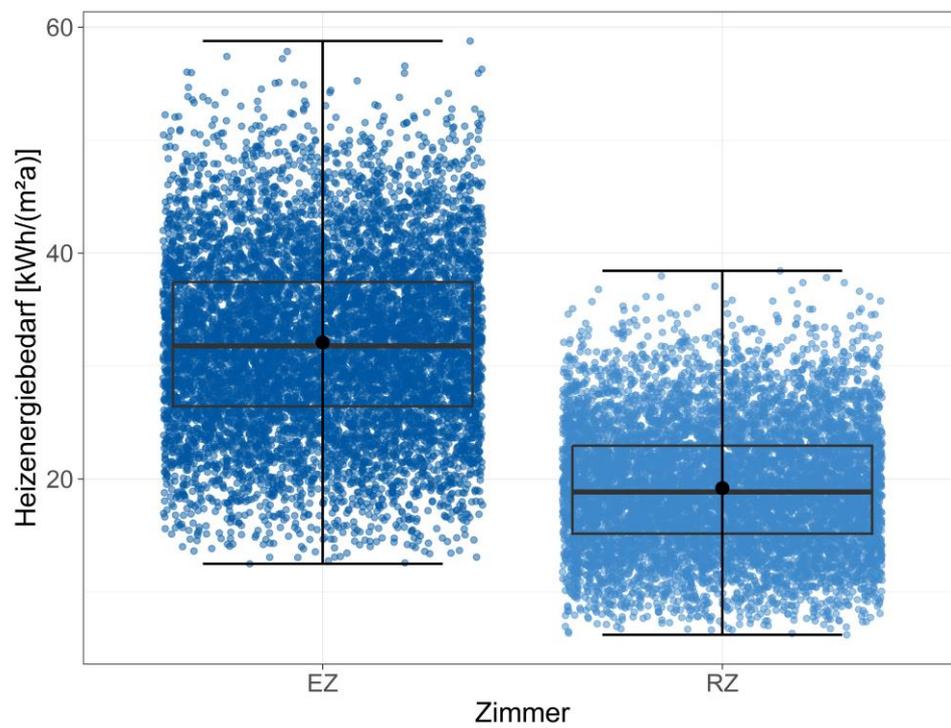


Abbildung 43: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit vom Eck- und Reihenzimmer (EZ bzw. RZ)

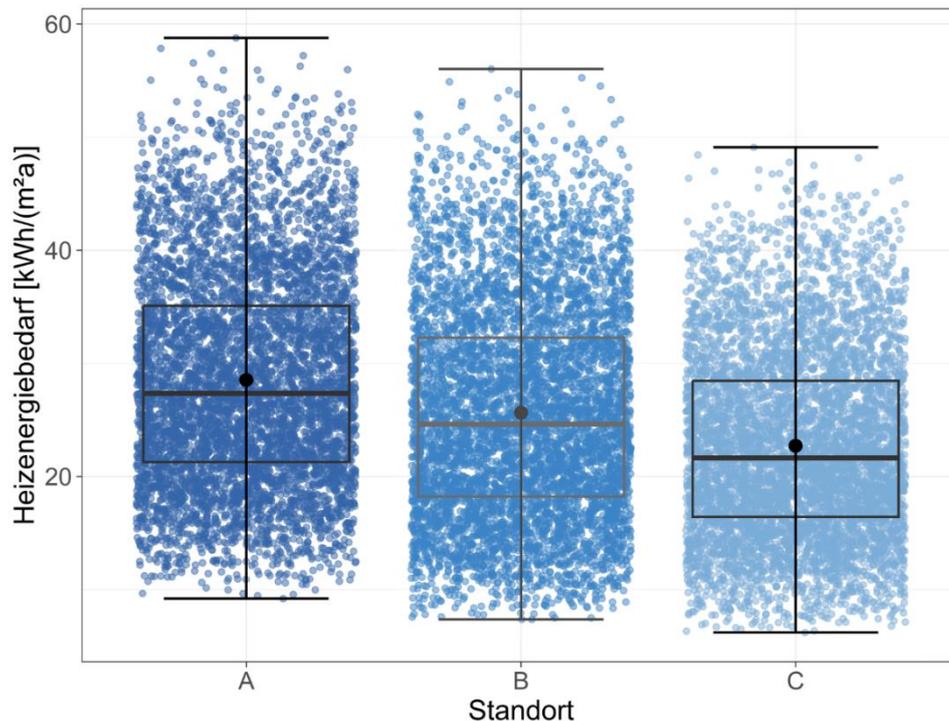


Abbildung 44: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit vom betrachteten Standort (A = Rostock, B = Potsdam, C = Mannheim)

Die Ergebnisse reichen von ca. 4 - 58 kWh/m²a und decken sich mit den folgenden gängigen Erkenntnissen zum winterlichen Wärmeschutz:

- Die direkte Sonneneinstrahlung spielt eine entscheidende Rolle, um die Heizenergiebedarfe zu senken.
- Je höher der Raum (größeres Luftvolumen), desto größer der Heizenergiebedarf. Die Ergebnisse zeigen einen generellen Anstieg von ca. 1 kWh/m²a für jeden zusätzlichen 0,1 m der Raumhöhe.
- Das Reihenzimmer mit nur einer Fassade hat im Durchschnitt einen geringeren Heizenergiebedarf als das Eckzimmer. Ungünstige Reihenzimmerkonfigurationen haben demnach vergleichbare Heizenergiebedarfe wie günstige Eckzimmerkonfigurationen.
- Je größer der grundflächenbezogene Fensterflächenanteil ist, desto größer ist der Heizenergiebedarf. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass Fenster im Vergleich zu Außenwänden höhere U Werte aufweisen.
- Bei der Analyse von fassaden- oder bauteilbezogenen Parametern korreliert der Heizwärmebedarf gut mit den U-Werten der vier Bautypen. Da die Werte jedoch in einem engen Bereich liegen (0,14 W/m²K bis 0,27 W/m²K), sind keine großen Unterschiede festzustellen.
- Der Gesamtenergiedurchlassgrad spielt im Winter im Vergleich zum Sommer eine untergeordnete Rolle. Der größte Heizenergiebedarf entsteht, wenn die Sonneneinstrahlung an sonnigen Wintertagen nicht genutzt werden kann - so beispielsweise bei der Sonnenschutzverglasung. Mit insgesamt wärmeren Standorten sinkt der Heizenergiebedarf. Um mehr Standorte für eine umfangliche Klimakategorisierungen für das gesamte Bundesgebiet zu berücksichtigen, werden in der DIN/TS 12831-1 in einer detaillierten Auflösung Richtwerte für Heizungsberechnungen beschrieben. Aufgrund der bereits sehr hohen Anzahl an Varianten sowie dem Fokus dieses Projektes auf den sommerlichen Wärmeschutz wurde diese detailliertere Auflösung zur Berechnung der Heizenergiebedarfe nicht berücksichtigt.

Statistische Analyse

Die folgenden Abbildungen 45 und 46 zeigen zwei unterschiedliche Darstellungsweisen einer Korrelationsmatrix der Gewichtung der Einflüsse der einzelnen Varianten auf die Zielgröße des Heizenergiebedarfs. Beiden Darstellungen liegt eine Spearman-Korrelation zu Grunde.

Der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman ist ein quantitatives Maß zur Bewertung der Beziehung zwischen zwei diskreten Merkmalen. Für die Berechnung des Koeffizienten wird statt des tatsächlichen Messwertes der Rang der jeweiligen Messwerte verwendet. Dabei bedeutet ein Wert von +1 einen streng monoton steigenden Zusammenhang zwischen der Ausprägung beider Merkmale. Umgekehrt bedeutet ein Wert von -1, dass es einen streng monoton fallenden Zusammenhang gibt. In den folgenden Abbildungen werden die positiven Werte farblich rot und die negativen Werte farblich blau getönt dargestellt. Tendiert der Wert gegen Null, dann ist kein Zusammenhang zwischen den Ausprägungen beider Merkmale festzustellen. (Hilgers, Heussen & Stanzel, 2019) Der Koeffizient berechnet sich wie folgt (Kronthaler, 2021) nach Gleichung 5:

$$r_{Sp} = \frac{\sum(R_{xi} - \bar{R}_x)(R_{yi} - \bar{R}_y)}{\sqrt{\sum(R_{xi} - \bar{R}_x)^2 \sum(R_{yi} - \bar{R}_y)^2}} \quad (5)$$

Dabei sind

R_{xi} und R_{yi}	Rang von x_i und Rang von y_i
\bar{R}_x und \bar{R}_y	Mittelwert der Ränge von x und von y

In Abbildung 45 sind die Werte der Korrelationskoeffizienten oberhalb der Diagonalen eingetragen. Auf der Diagonalen sind die einzelnen Einflüsse mit der jeweiligen Verteilung der Varianten darstellt. So gibt es beispielsweise für die Belegung des betrachteten Raumes zwei mögliche Werte, welche für Homeoffice und normale Belegung mit den Werten 0 und 1 dargestellt werden. Für den Fensterflächenanteil gibt es dagegen fünf mögliche Werte, die den Fensterflächenanteilen, welche in der Variantenmatrix dargestellt sind, entsprechen. Diese Werte können sowohl oberhalb als auch unterhalb der Korrelationsmatrix abgelesen werden. Alle Parameter, die anhand von numerischen Werten in der Variantenmatrix abgebildet sind, werden in der Korrelationsmatrix mit diesen Werten abgebildet. Alle anderen Parameter werden mit Platzhalterwerten abgebildet.

Die linke Spalte der Korrelationsmatrix zeigt die Streudiagramme der jeweiligen Einflüsse. In der oberen Zeile ist die Verteilung des Heizenergiebedarfs unter Berücksichtigung aller Einflüsse dargestellt. Darunter folgen die Streudiagramme der einzelnen Einflüsse. Dabei stellen die schwarzen Punkte die Verteilung des Heizenergiebedarfs bei einem gegebenen Einfluss dar und die roten Linien die Veränderung des Heizenergiebedarfs bei der Veränderung des Wertes für den Einfluss. Beispielsweise steigt der Heizenergiebedarf mit dem Fensterflächenanteil. Die Signifikanzniveaus werden in Abhängigkeit vom Korrelationskoeffizienten (=p-Wert, siehe Tabelle 10) mit einem (*) bis drei (***) Sternen angegeben.

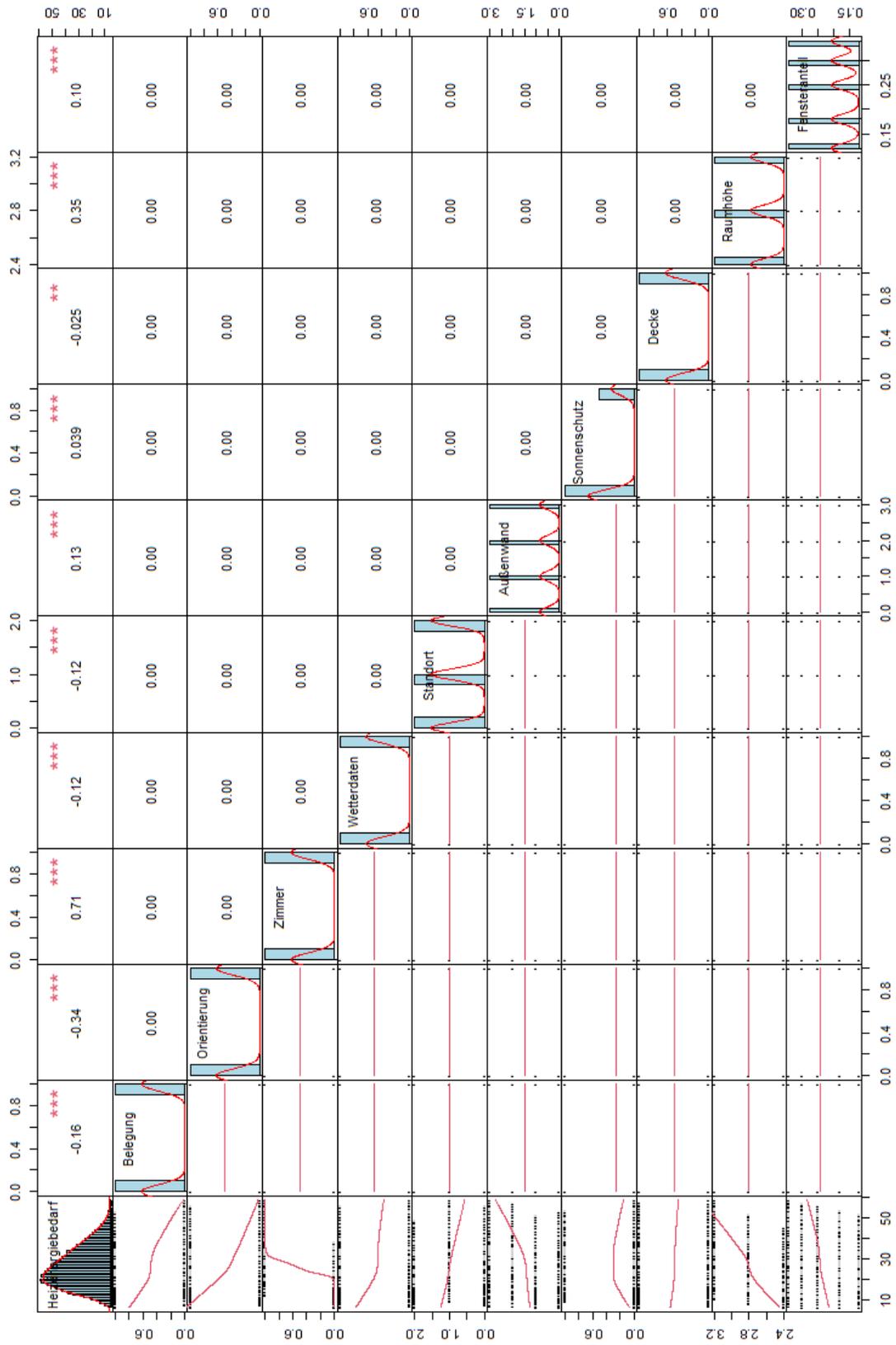


Abbildung 45: Korrelationsmatrix der Einflüsse des winterlichen Wärmeschutzes (Darstellung 1)

Ein p-Wert von 0,05 bedeutet, dass eine Wahrscheinlichkeit von 5 % besteht, dass dieses Ergebnis durch Zufall zustande gekommen ist. Je kleiner der p-Wert desto signifikanter ist das Ergebnis. Somit weisen mit Ausnahme der Korrelation zwischen der Decke und dem Heizenergiebedarf alle Ergebnisse ein sehr hohes Signifikanzniveau auf. Dies ist logisch, da adiabate Bedingungen zu den Nachbarräumen über und unter den Testräumen angenommen wurden.

Tabelle 10: Definition des Signifikanzniveaus

Signifikanzniveau ein (*) bis drei (***) Sterne		Korrelationskoeffizient (p-Wert)
ein Stern	*	p-Wert = 0,0001
zwei Sterne	**	p-Wert = 0,01
drei Sterne	***	p-Wert = 0,05

In Abbildung 46 werden lediglich die Korrelationskoeffizienten der einzelnen Einflüsse im Zusammenhang mit dem Heizenergiebedarf dargestellt. Die Darstellung erfolgt als einzelne Tortendiagramme, die anhand der Farbe einen steigenden (blau) oder fallenden (rot) Zusammenhang darstellen.

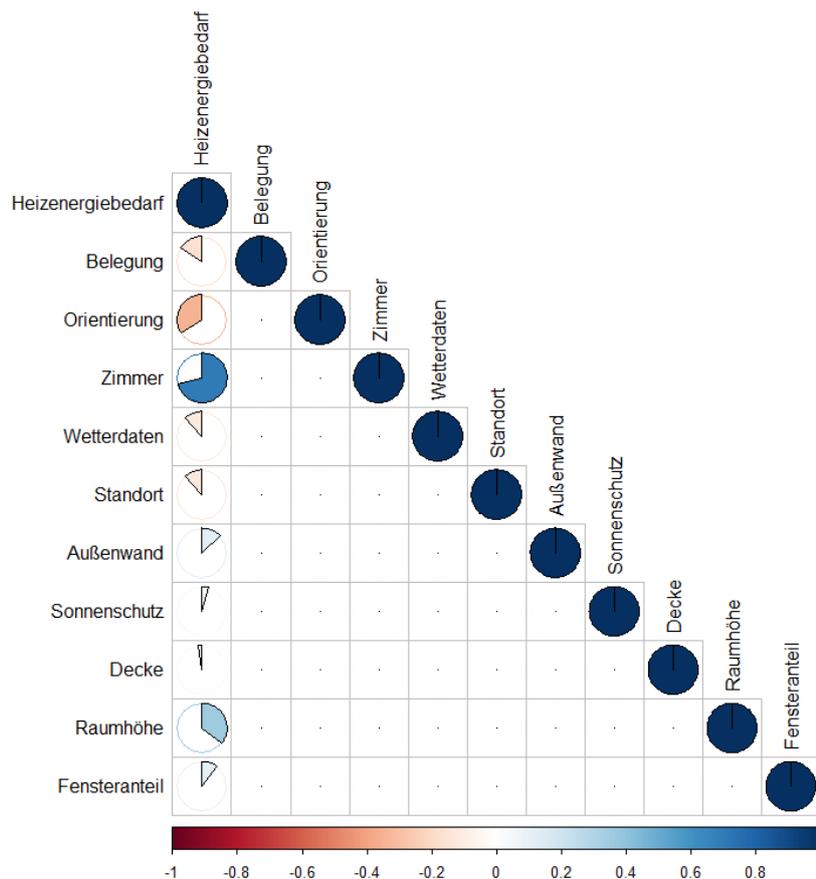


Abbildung 46: Korrelationsmatrix der Einflüsse des winterlichen Wärmeschutzes (Darstellung 2)

Fazit zum winterlichen Wärmeschutz

Aus den Darstellungen des Kapitels 8.1 lassen sich die folgenden Rückschlüsse zum winterlichen Wärmeschutz ziehen.

- Größere Außenwandflächen erhöhen den Heizenergiebedarf, insbesondere wenn diese Flächen mit Fenstern bestückt sind, die schlechtere U-Werte aufweisen als opake Flächen.
- Darüber hinaus spielen Faktoren wie Raumausrichtung und Raumhöhe eine signifikante Rolle für den Heizenergiebedarf. Die Optimierung dieser Parameter nur hinsichtlich des Heizwärmebedarfs könnte jedoch in den heißen Monaten des Jahres kontraproduktiv sein.
- Der Einsatz verschiedener Außenwandkonstruktion mit unterschiedlichen Rohdichten hat keinen nennenswerten Einfluss auf den Heizenergiebedarf bei den untersuchten Geschoßwohnungsbauten. Wie bei anderen Studien nachgewiesen, ist der Heizenergiebedarf von Geschosswohnungsbauten im Wesentlichen von der energetischen Qualität der Gebäudehülle, U Werte und Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} abhängig (Schlitzberger et al., 2017).

Sommerlicher Wärmeschutz

Zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit im Sommer existieren eine Reihe von Normen. In DIN 4108-2:2013 werden Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz bei Neubauten oder Erweiterungen über 50 m² gestellt. Zusätzlich bietet die DIN EN 16798-1:2022 Richtlinien zur Bewertung der Behaglichkeit in Innenräumen. Diese Norm sieht andere Bewertungsmethoden vor als die Bewertung im nationalen Anhang.

Die Analyse der Ergebnisse gliedert sich in zwei Hauptteile. Zunächst werden die Gesamtheit der untersuchten Varianten, die Boxplots und die aus den Ergebnissen entstehenden Korrelationen dargestellt. In der statistischen Auswertung wird dann die Relevanz der untersuchten Parameter für den sommerlichen Wärmeschutz dargestellt. Darauf aufbauend wird anhand repräsentativer Fälle die Auswirkung verschiedener Außenwandtypen und Fensterkennzahlen auf die Überhitzungsproblematik veranschaulicht.

Simulationsergebnisse

Sämtliche in der Variantenmatrix aufgeführten Varianten werden im Folgenden in Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz dargestellt. Dabei werden die Übertemperaturstunden berücksichtigt und verschiedene Darstellungsmöglichkeiten verwendet.

Boxplots

Mittels des Begriffs "Übertemperaturhäufigkeit" werden alle Stunden berücksichtigt, in denen die adaptiven Komfortbereiche überschritten werden. In DIN EN 15251 wird eine zulässige Anzahl von Überhitzungstunden festgelegt, die den menschlichen Komfort nicht beeinträchtigen soll. Die zugehörigen Kategorien basieren auf der DIN EN ISO 7730, die sich auf die "Berechnung des PMV und des vorhergesagten Prozentsatzes der Unzufriedenen" bezieht. Werte von 3 % (entspricht 259 h/a) und 5 % (entspricht 432 h/a) während der Nutzungszeit sind nach DIN EN 15251 annehmbare Schwellenwerte. Obwohl diese Norm durch die DIN EN 16798 ersetzt wurde, werden weiterhin die Schwellenwerte aus DIN EN 15251 verwendet. Das liegt daran, dass bei den in der DIN EN 16798 definierten Schwellenwerten nicht zwischen Gebäuden mit und ohne Kühlsystem unterschieden wird, somit sind sie für die vorliegende Studie nicht geeignet. Die oben erwähnten 3 % bzw. 5 % sind zudem auch in Gebäudezertifizierungssystemen wie dem DGNB enthalten, wobei 3 % die Grenze für die höchste Punktzahl und 5 % die mittlere Punktzahl darstellen. In den folgenden Abbildungen 47 bis 58 werden die Übertemperaturstunden in [h/a] jeweils einzeln in Abhängigkeit vom Fensterflächenanteil, dem Gesamtenergiedurchlassgrad der Fenster, der Verglasung, des Sonnenschutzes, der Raumhöhe, dem Aufbau der Außenwand, dem Aufbau der Innendecke, der Raumbelegung, der Raumorientierung, den Wetterdaten, der Lage des Zimmers sowie dem Gebäudestandort darstellt. Alle Ergebnisse aus den Simulationsvarianten erscheinen als Punkte in den Box-Plots.

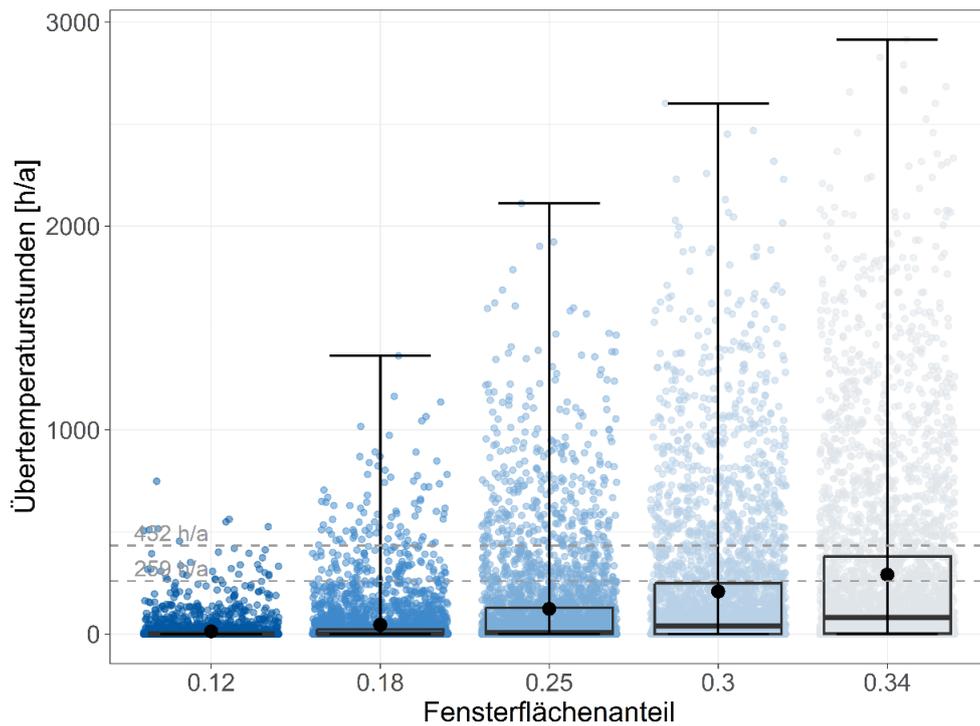


Abbildung 47: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit vom grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil f'

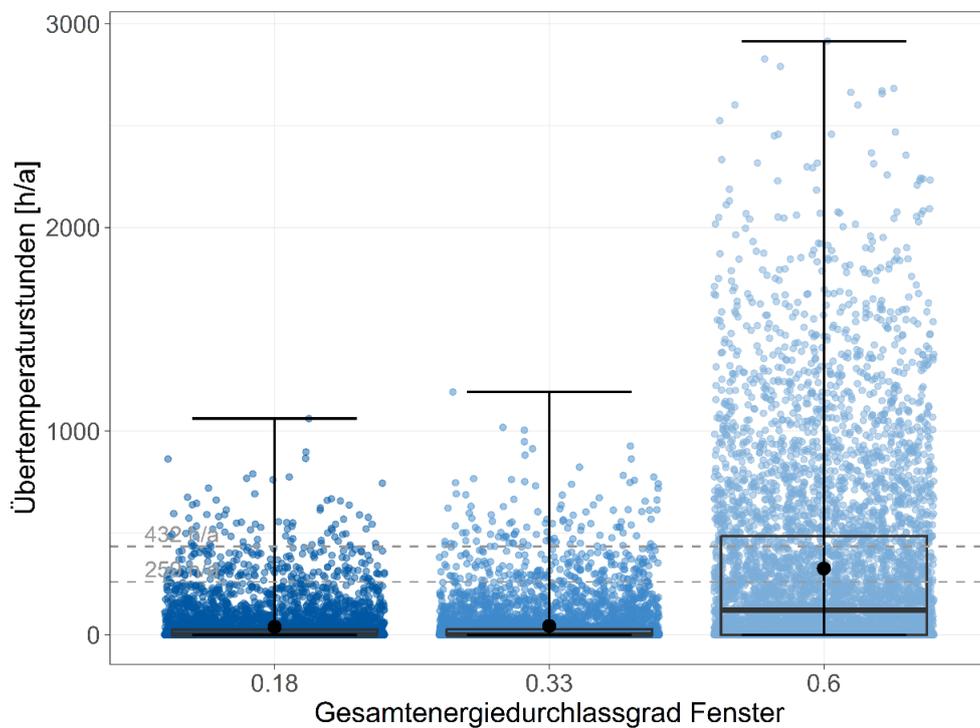


Abbildung 48: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit vom Gesamtenergiedurchlassgrad der Fenster

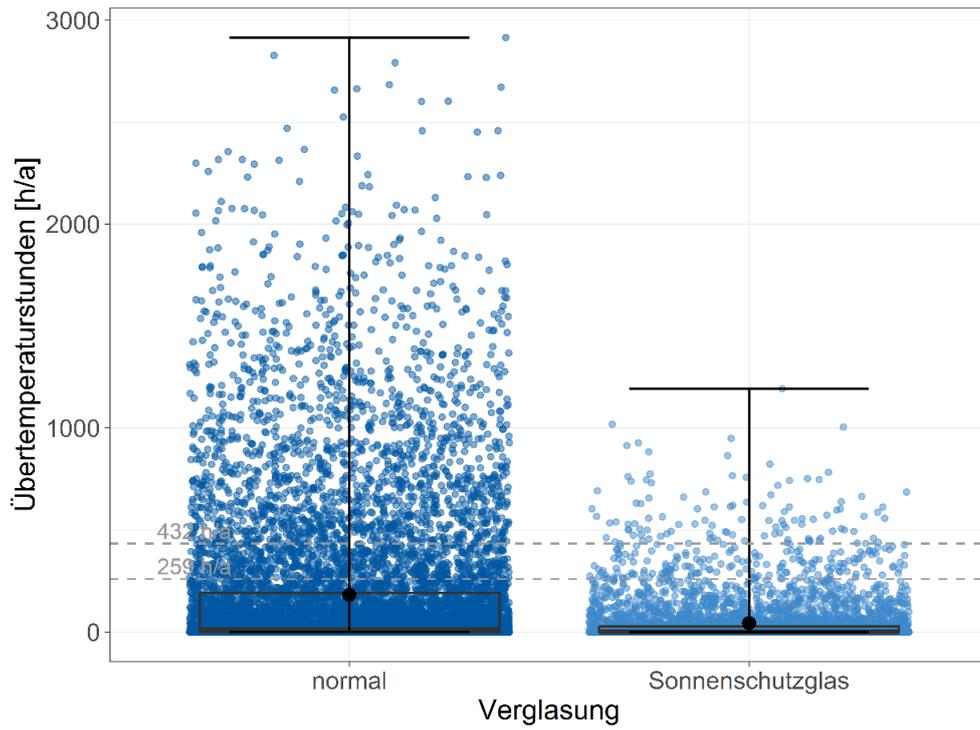


Abbildung 49: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit von der Verglasung

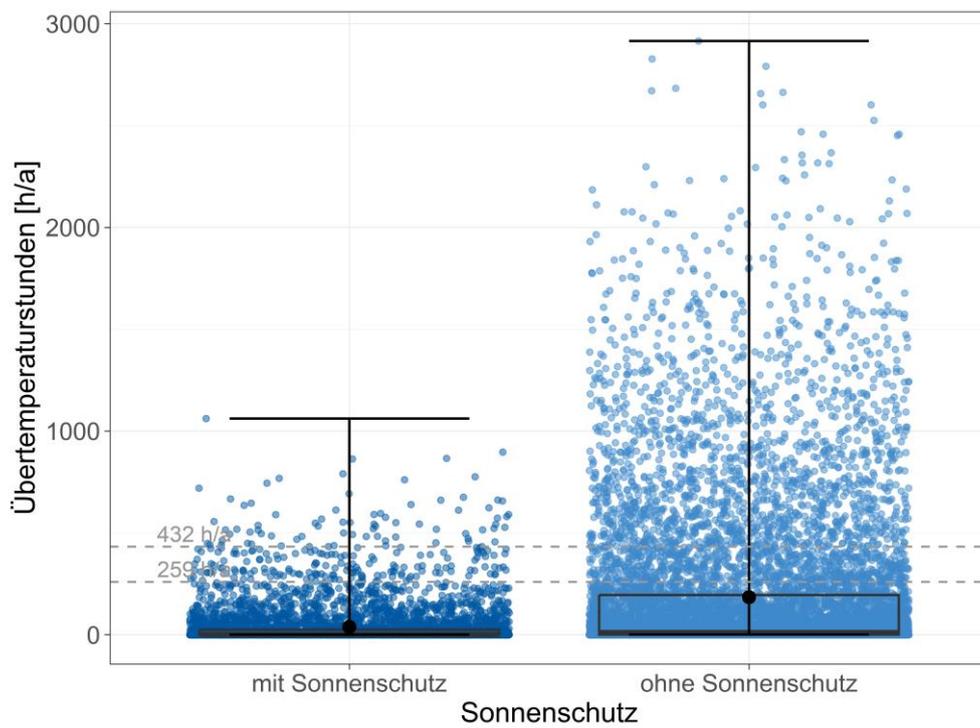


Abbildung 50: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit vom Sonnenschutz

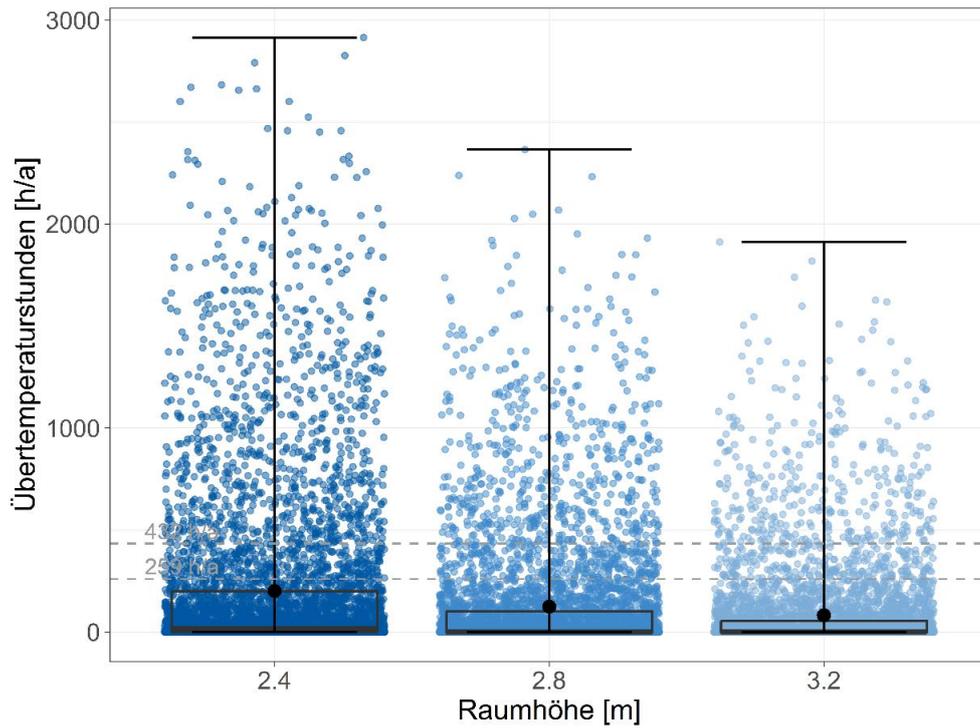


Abbildung 51: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit von der Raumhöhe

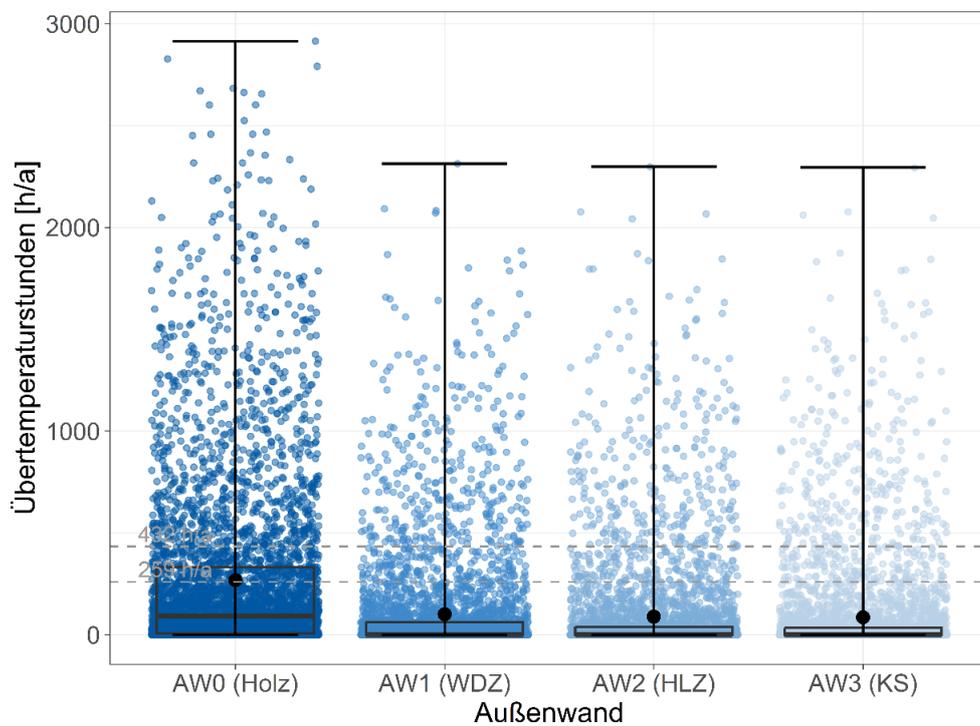


Abbildung 52: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit von den Außenwänden AW0 bis AW3.

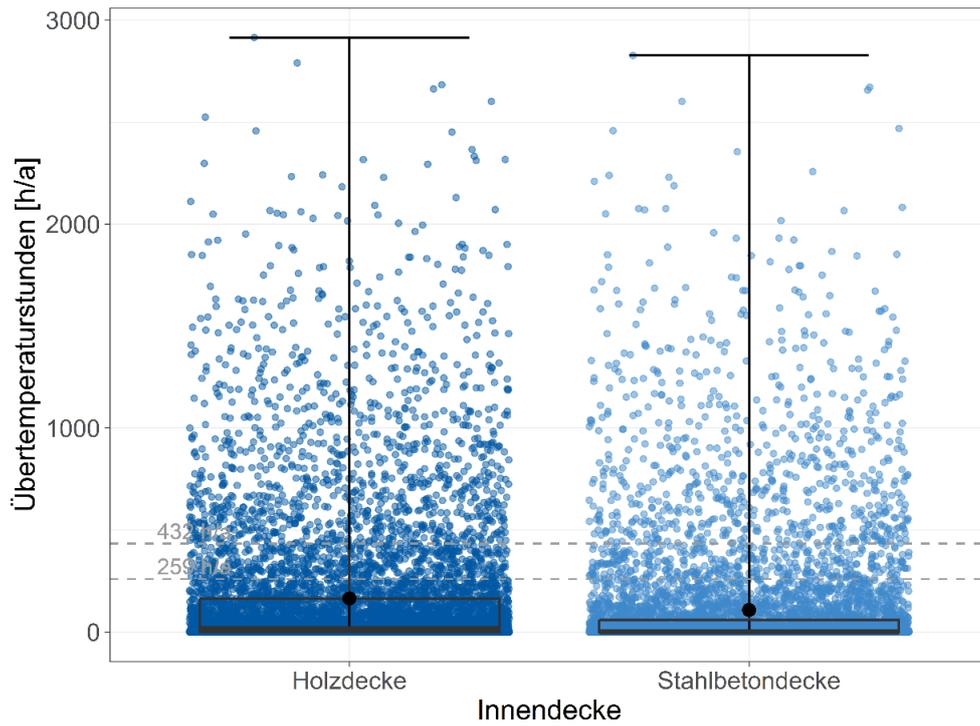


Abbildung 53: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit von der Innendecke

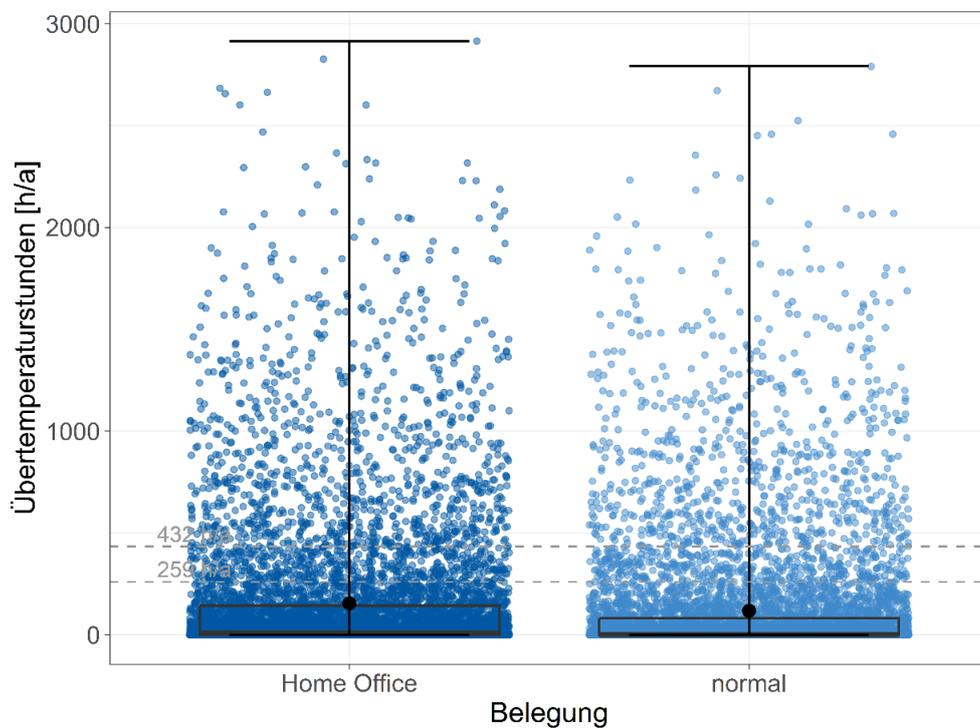


Abbildung 54: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit von der Belegung

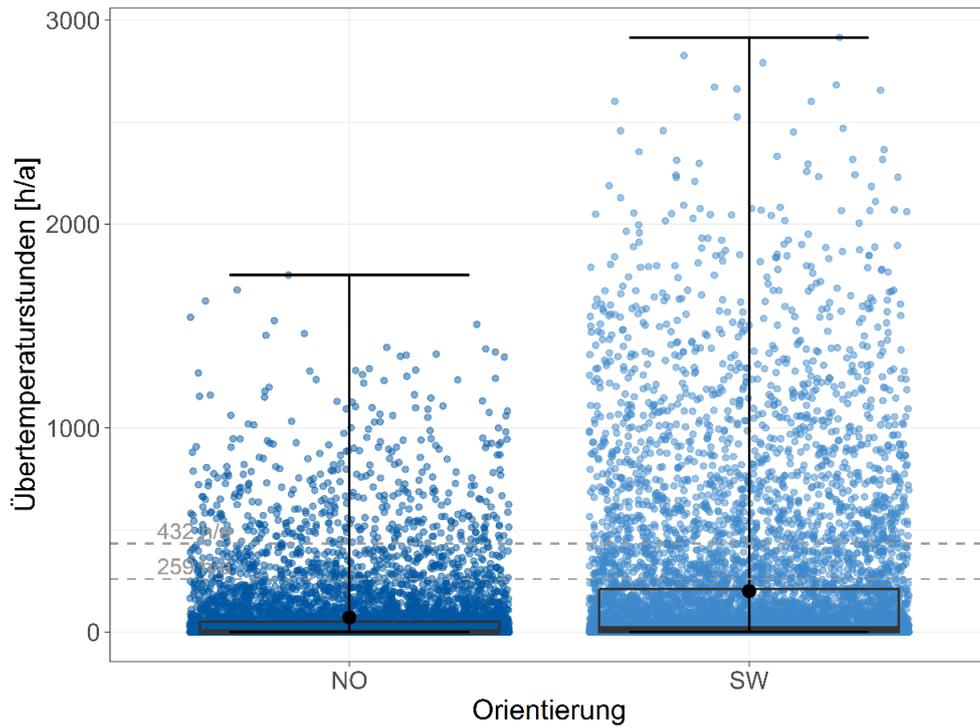


Abbildung 55: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit von der Gebäudeorientierung

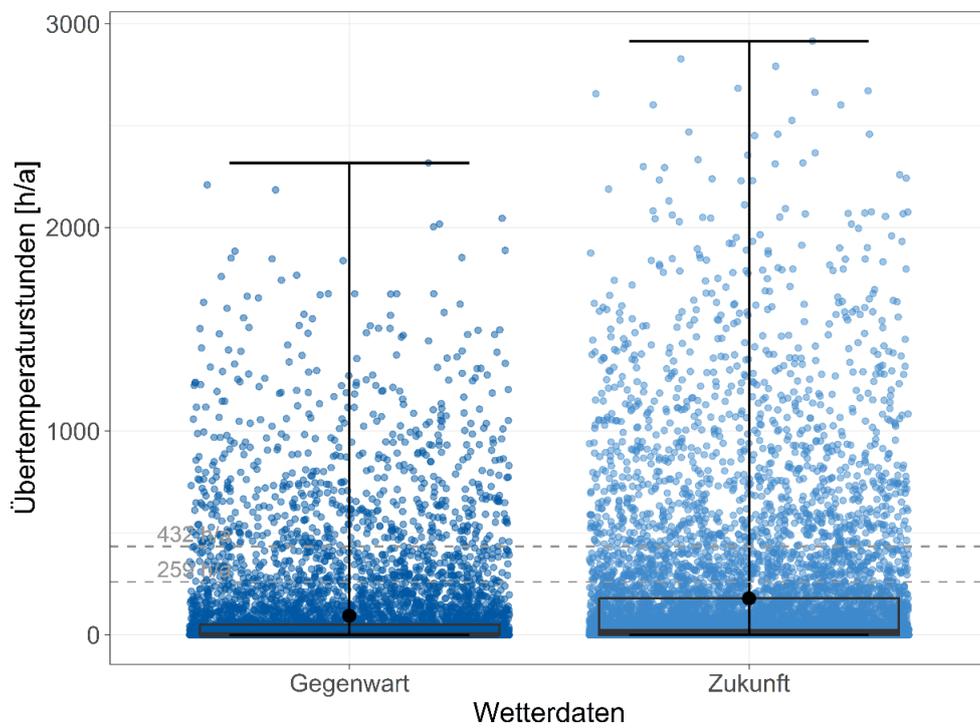


Abbildung 56: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit von den zugrundeliegenden Wetterdaten

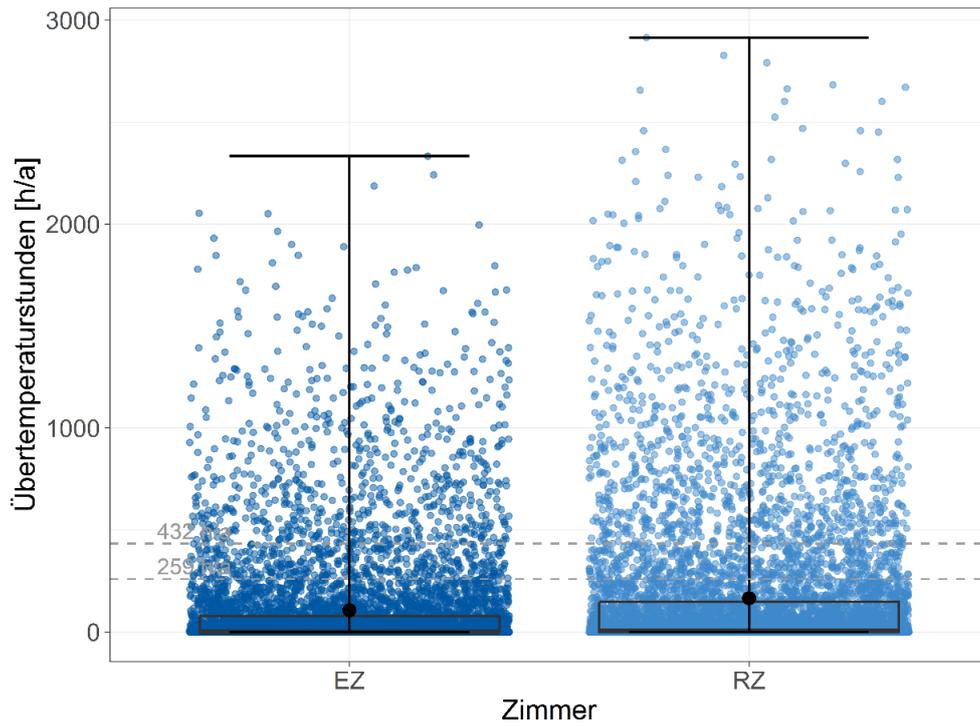


Abbildung 57: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit vom Eck- und Reihenzimmer (EZ bzw. RZ)

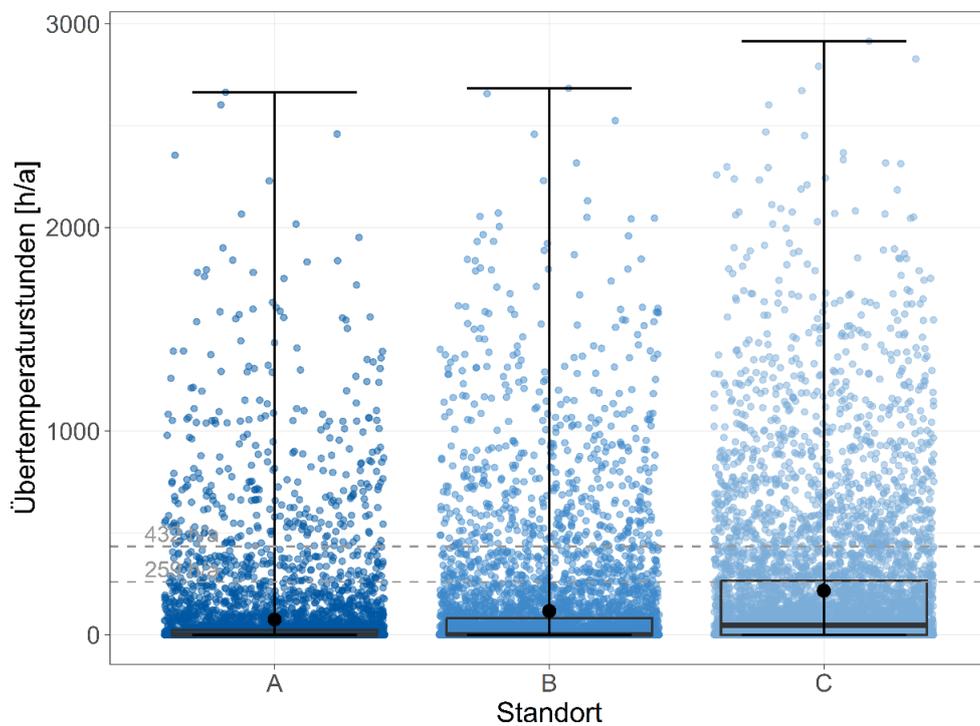


Abbildung 58: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit vom betrachteten Standort (A = Rostock, B = Potsdam, C = Mannheim)

Die Ergebnisse reichen von ca. 0 – 2900 [h/a] und decken sich mit den folgenden gängigen Erkenntnissen zum sommerlichen Wärmeschutz:

- Je größer der grundflächenbezogene Fensterflächenanteil ist, desto mehr Übertemperaturstunden gibt es.
- Wird nicht nur die Fensterfläche, sondern ebenfalls ein möglicher Sonnenschutz sowie die Art der Verglasung berücksichtigt, dann ergeben sich Übertemperaturstunden in Abhängigkeit vom Gesamtenergiedurchlassgrad. Während die Ergebnisse für einen Energiedurchlassgrad von 0,18 sowie 0,33 in einem ähnlichen Wertebereich von 0 bis ca. 1100 sowie 1300 [h/a] liegen, gibt es mehr als doppelt so viele Übertemperaturstunden bei einem Gesamtenergiedurchlassgrad von 0,6.
- Sowohl der Einbau einer Sonnenschutzverglasung als auch der eines Sonnenschutzes führt zu einer deutlichen Reduzierung der Übertemperaturstunden.
- Je höher der Raum (größeres Luftvolumen), desto weniger Übertemperaturstunden entstehen. Die Ergebnisse zeigen eine generelle Reduzierung von ca. 100 h/a für jede zusätzlichen 0,1 m in der Raumhöhe.
- Die Übertemperaturstunden in Abhängigkeit von der Außenwand zeigen deutlich, dass eine massive Bauweise zu weniger Übertemperaturstunden führt als eine leichte Bauweise. Die Unterschiede zwischen den drei verschiedenen massiven Bauweisen sind jedoch eher gering. Dagegen entstehen kaum Unterschiede bei den Übertemperaturstunden bei einer Holzdecke und einer Stahlbetondecke.
- Die Orientierung nach Südwesten führt zu deutlich mehr Übertemperaturstunden als eine Orientierung nach Nordosten.
- Ebenso entstehen mehr Übertemperaturstunden, wenn für die Simulation die zukünftigen Wetterdaten statt die Wetterdaten der Gegenwart genutzt werden.
- Das Reihenzimmer mit nur einer Fassade hat im Durchschnitt mehr Übertemperaturstunden als das Eckzimmer. Dies ist hier allerdings darauf zurückzuführen, dass im Eckzimmer eine bessere Durchlüftung erreicht werden kann, die zur Nachtabkühlung des Innenraums genutzt werden kann.
- Die Übertemperaturstunden für den Standort A sind am geringsten und steigen jeweils im Vergleich bei Standort B und Standort C leicht an.

Statistische Analyse

Die folgenden Abbildungen 59 und 60 zeigen zwei unterschiedliche Darstellungsweisen einer Korrelationsmatrix mit der Gewichtung der Einflüsse der einzelnen Varianten auf die Zielgröße der Übertemperaturstunden. Beiden Darstellungen liegt eine Spearman-Korrelation zu Grunde. Beide Darstellungen sind anhand der gleichen Grundsätze wie die Abbildungen 45 und 46 zu interpretieren. Somit werden in Abbildung 59 ebenfalls die steigenden sowie die fallenden Korrelationskoeffizienten, die Streudiagramme der einzelnen Einflüsse und das Signifikanzniveau anhand der Anzahl der Sterne dargestellt. Ein Stern (*) entspricht wiederum einem geringen Signifikanzniveau und drei Sterne (***) wiederum einem hohen Signifikanzniveau.

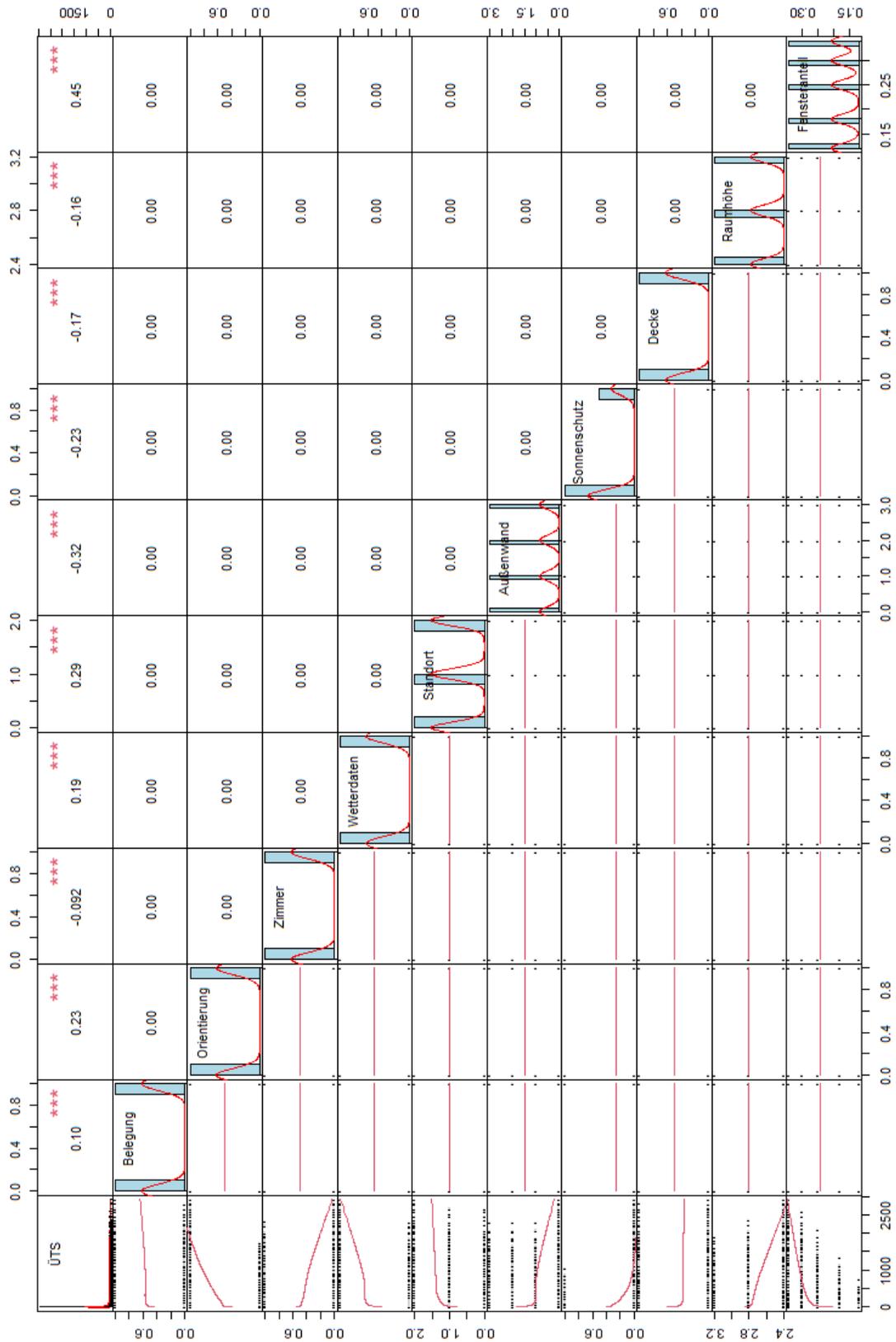


Abbildung 59: Korrelationsmatrix der Einflüsse des sommerlichen Wärmeschutzes (Darstellung 1)

In Abbildung 60 werden lediglich die Korrelationskoeffizienten der einzelnen Einflüsse im Zusammenhang mit den Übertemperaturstunden dargestellt. Die Darstellung erfolgt als einzelne Tortendiagramme die anhand der Farbe einen steigenden (blau) oder fallenden (rot) Zusammenhang darstellen.

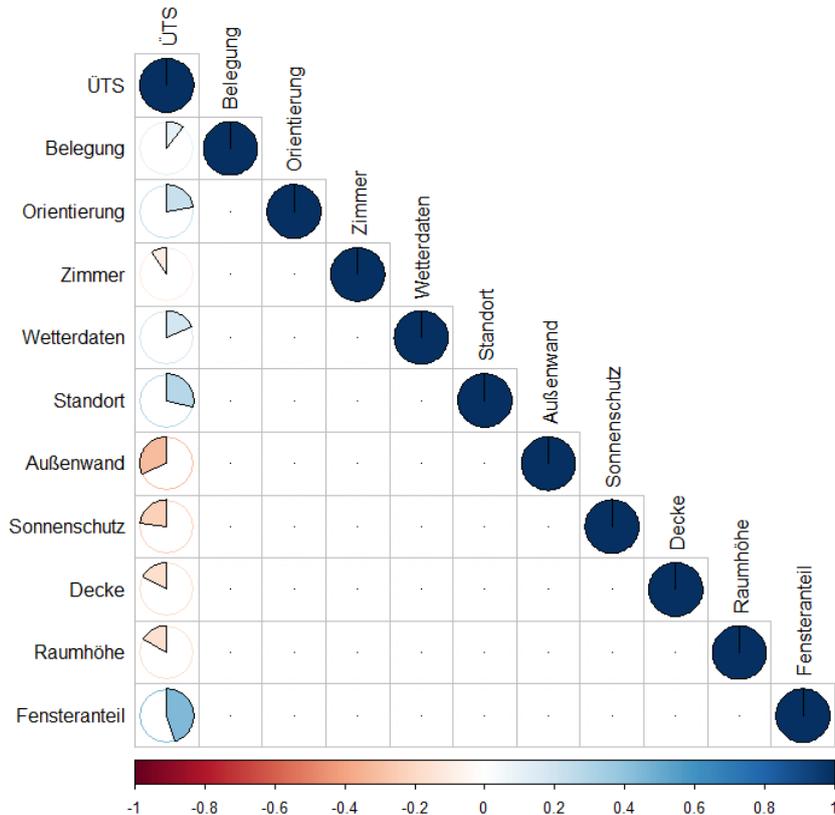


Abbildung 60: Korrelationsmatrix der Einflüsse des sommerlichen Wärmeschutzes (Darstellung 2)

Zur weiteren detaillierten Auswertung werden die folgenden Abbildungen 61 und 62 genutzt, in denen die Korrelationskoeffizienten abgebildet sind. Sie werden nach ihrem Einfluss auf die Zielgröße der Übertemperaturstunden eingeteilt. Hierfür werden die Absolutwerte der Koeffizienten berücksichtigt und die Einteilung des Einflusses erfolgt nach klein (0,1 – 0,3), mittel (0,3 – 0,5) und groß (> 0,5) (Cohen, 1992). In Abbildung 61 wurden alle 17.280 Varianten berücksichtigt. Aus dieser Darstellung kann festgestellt werden, dass der grundflächenbezogene Fensterflächenanteil, der Gesamtenergiedurchlassgrad und die Außenwand den größten Einfluss auf die Übertemperaturstunden zeigen, während die Raumhöhe, die Belegung des Raumes und die Lage des Zimmers (Eck- oder Reihenzimmer) den geringsten Einfluss besitzen. In Abbildung 62 wurden sämtliche Varianten mit einer Außenwand als Leichtbaukonstruktion aus der Darstellung ausgeschlossen. Damit lässt sich feststellen, dass der Einfluss der Außenwand von der Position des dritt größten Einflusses sich auf die letzte Position und somit den geringsten Einfluss auf die Übertemperaturstunden verschiebt. Somit hat die Rohdichte des verwendeten Ziegels einen geringen Einfluss auf die entstehenden Übertemperaturstunden.

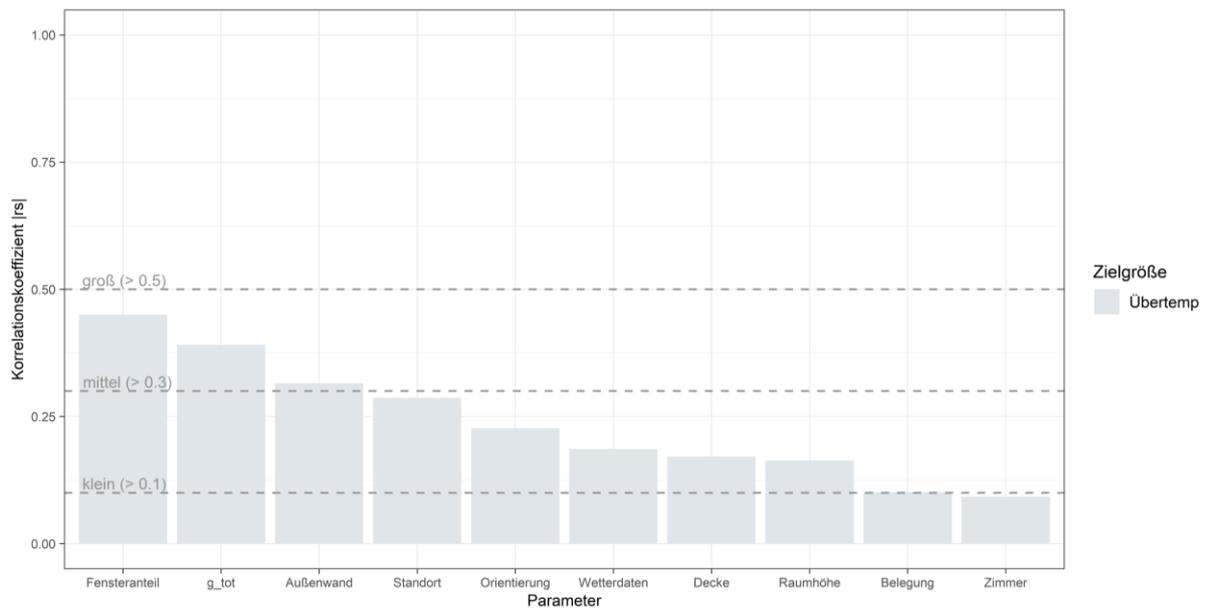


Abbildung 61: Korrelationskoeffizienten der Parameter auf die Zielgröße der Übertemperaturstunden – Berücksichtigung leichter und massiver Bauweisen

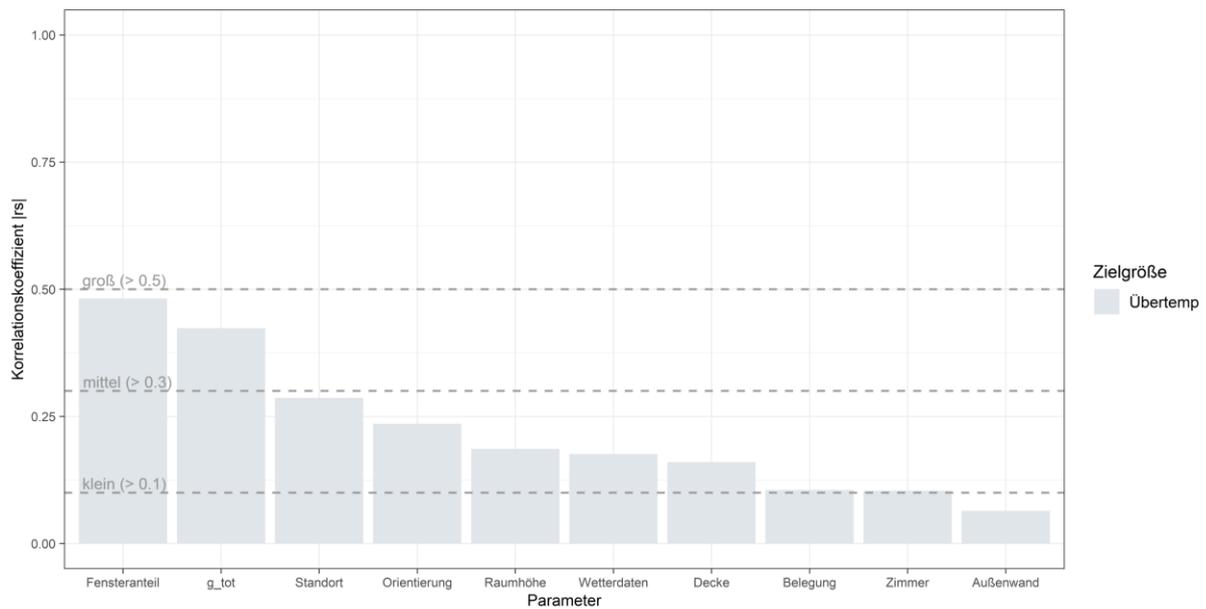


Abbildung 62: Korrelationskoeffizienten der Parameter auf die Zielgröße der Übertemperaturstunden – Berücksichtigung massiver Bauweisen

Liniendiagramme

Hier werden die 17.280 simulierten Varianten in verschiedenen Schritten gefiltert und exemplarisch einige Szenarien im Detail präsentiert. Die Diagramme befinden sich in den Anhängen A bis C. Grundsätzlich wird der Gesamtenergiedurchlassgrad, der Standort, die Lage des Raumes, die Belegung, die Raumhöhe, die Bauweise der Raumdecke sowie die Orientierung des Raumes berücksichtigt. In jedem der Liniendiagramme werden die sich ergebenden Übertemperaturstunden für die vier möglichen Außenwandkonstruktionen im Zusammenhang mit einem zunehmenden Fensterflächenanteil dargestellt. Aus den Liniendiagrammen lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen benennen:

- Das Eckzimmer nach Südwesten weist erwartungsgemäß insgesamt höhere ÜTS-Werte auf als das Eckzimmer nach Nordosten und ist daher für die weitere Analyse besser geeignet.
- ÜTS-Werte variieren in Abhängigkeit von der Klimaregion, dabei gilt die folgende Prämisse: $\text{ÜTS}(\text{Klimaregion A}) < \text{ÜTS}(\text{Klimaregion-B}) < \text{ÜTS}(\text{Klimaregion-C})$
- ÜTS-Werte variieren in Abhängigkeit von den Wetterdaten und der Raumbelegung. Dabei gilt: $\text{ÜTS}(\text{TRY-45 VO \& Normale Belegung}) < \text{ÜTS}(\text{TRY-45 VO \& Home Office}) < \text{ÜTS}(\text{RCP 4.5 2080 \& Normale Belegung})$. Je größer der grundflächenbezogene Fensterflächenanteil ist, desto größer ist der ÜTS-Wert.
- Je geringer die Raumhöhe bei gleichen Baumaterialien ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einer Überhitzung kommt. Je geringer die Dichte der Außenwände ist, desto höher ist die Menge an ÜTS. Die Varianten AW2 ($\rho=1200 \text{ kg/m}^3$) und AW3 ($\rho=1800 \text{ kg/m}^3$) verhalten sich jedoch nahezu identisch.
- Der Einsatz von Massivholzdecken bewirkt, dass mit Ausnahme des niedrigsten in dieser Studie analysierten grundflächenbezogenen Fensterflächenanteils (12 %) ein großer Unterschied zwischen Außenwänden aus massiven Materialien mit höheren Dichten und Außenwänden aus einer Leichtbaukonstruktion besteht. Je größer der Fensterflächenanteil ist, desto größer ist hierbei das sich ergebende Stunden-Delta.
- Bei einem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil von 25 % führt die Verwendung von Stahlbetondecken zu einer Verringerung von etwa 300 ÜTS im Vergleich zur gleichen Variante mit einer Massivholzdecke. Je nach Klimaregion, Raumhöhe und Art der Wandkonstruktion kann die Pufferwirkung größer oder kleiner sein. Bei geringer Raumhöhe und geringer Rohdichte der Außenwandkonstruktion weist die Stahlbetondecke im Vergleich zur gleichen Variante mit einer Massivholzdecke das größte Potential zur Pufferung von Überhitzungsstunden auf.

Fazit zum sommerlichen Wärmeschutz

Aus den Darstellungen des Kapitels 8.2 lassen sich die folgenden Rückschlüsse zum sommerlichen Wärmeschutz ziehen.

- Die Korrelationsdiagramme zeigen die drei wichtigsten Parameter, die den sommerlichen Wärmekomfort beeinflussen: Fensterflächenanteil, Gesamtenergiedurchlassgrad, jeweils mit positiver Korrelation und die Art der Außenwandkonstruktion mit negativer Korrelation, da die Anzahl der Stunden außerhalb der Komfortzone während heißer Perioden umso höher ist, je geringer die Rohdichte der Außenwand ist.
- Hinsichtlich des Raumtyps entsteht eine wichtige Erkenntnis zur natürlichen Lüftung. Ein Eckzimmer mit hoher Strahlungsexposition kann bessere sommerliche Behaglichkeitsergebnisse aufweisen als ein Reihenzimmer, sofern große natürliche Lüftungsraten beispielsweise mittels einer Querlüftung gewährleistet werden können.

Auswahl repräsentativer Varianten

Wie bereits gezeigt, sind die drei Parameter, die den sommerlichen Komfort am meisten beeinflussen, mit der Gebäudehülle verbunden. Aus diesem Grund werden in den Liniendiagrammen im Wesentlichen Analysen

bezüglich der Auswirkungen des Fensterflächenanteils und der Wandkonstruktionsarten auf die Überhitzungsstunden gezeigt.

Vor diesem Hintergrund und dem politischen Ziel der Bundesregierung, jährlich 400.000 klimafreundliche Wohneinheiten zu schaffen (Bundesbaupolitik, 2022), ist davon auszugehen, dass Massivholzdecken an Marktrelevanz gewinnen und einen größeren Teil der heute dominierenden Stahlbetondecken ersetzen wird. Als Alternative können aber ggf. auch Betondecken aus Recyclingbeton eine zunehmend wichtige Rolle spielen.

Varianten, die ein nach Südwesten orientiertes Eckzimmer simulieren und in der Klimaregion C (Mannheim) liegen, weisen große Unterschiede zu den restlichen Varianten auf. Eine eher in Altbauten typische Raumhöhe von 3,2 m ist heutzutage eher unwirtschaftlich und daher für neue Wohngebäude unüblich. Räume mit ca. 2,4 m Höhe bis 2,8 m Höhe sind eher üblich, je geringer das Luftvolumen ist, desto eher entstehen Überhitzungen.

Obwohl die Nutzung von Heimarbeitsplätzen in den vergangenen Jahren eine wichtige Rolle gespielt hat und die Arbeitsbedingungen immer flexibler werden, entspricht dieses Profil (noch) nicht der aktuellen Nutzung von Wohnräumen. Daher wird für den Rest der Analyse die Variante der normalen Belegung festgelegt.

Die folgenden Liniendiagramm zeigen beispielhaft Überschneidungen der festgelegten Grenzwerte in Abhängigkeit des grundflächenbezogenen Fensterflächenanteils mit einer Stahlbetondecke. Die dabei entstehenden Schnittpunkte stellen obere Schwellenwerte für Wohngebäude dar, die die Anforderungen an die Übertemperaturstunden erfüllen, ohne dass aktive Kühlsysteme betrieben werden müssen.

Mittels einer massiven Deckenkonstruktion können bei einem mittleren grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil f' von 25 % bis zu 300 Übertemperaturstunden im Vergleich zu einer Holzdeckenkonstruktion abgepuffert werden. Dies hängt jedoch von der Klimaregion, der Außenwandkonstruktion und weiteren Parametern wie der Raumhöhe oder der Belegungsart ab. Wenn zusätzlich, wie bisher jedoch noch unüblich im Geschosswohnungsbau, Verschattungseinrichtungen oder Sonnenschutzmaßnahmen verbaut werden, können die Übertemperaturstunden in allen Fällen signifikant gesenkt werden.

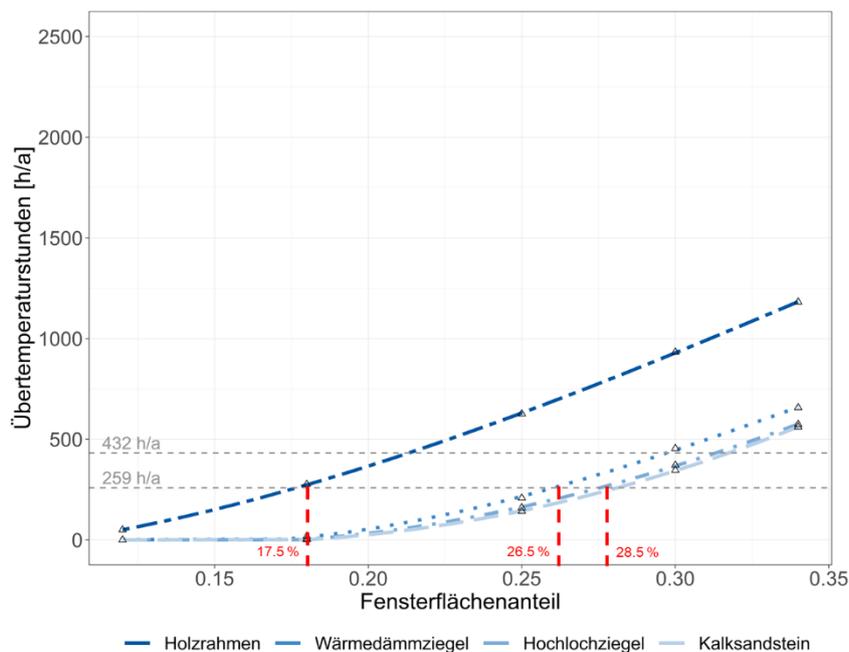


Abbildung 63: Eckzimmer – Gegenwart – Stahlbetondecke

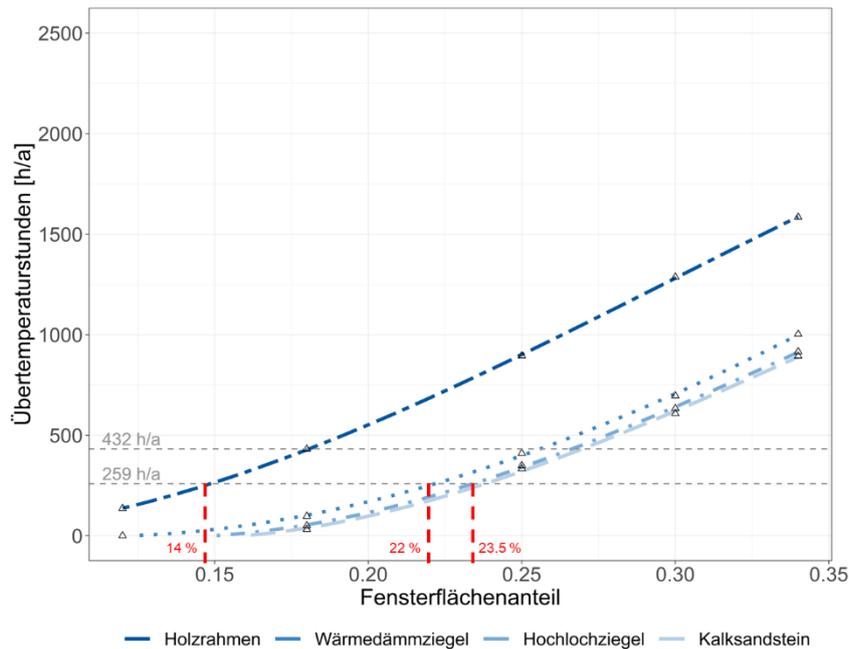


Abbildung 64: Eckzimmer – Zukunft – Stahlbetondecke

Im Folgenden werden trotz der Vielzahl möglicher Varianten typische Effekte gezeigt, die alle mit einer gewissen Unsicherheit bezüglich künftiger bautechnischer Umsetzungen behaftet sind.

Tageslichtversorgung

Eine günstige Versorgung mit Tageslicht ist bisher im Wohnungsbau eher als untergeordnet zu bezeichnen, wo hingegen bei Arbeitsplätzen normative Vorgaben vorhanden sind. Sonnenschutzmaßnahmen und eine ausreichende Versorgung mit Tageslicht stehen dabei je nach Art der baulichen Ausführungen gegebenenfalls im Widerspruch zueinander. Daher muss insbesondere bei zukünftig häufigeren Nutzungen als Homeoffice überprüft werden, wie dies im Einzelnen gelöst werden kann.

Als Ergebnis der vorangegangenen Analyse wurden Obergrenzen für das Fensterflächenverhältnis festgelegt, wenn keine Kühlsysteme eingesetzt werden. Mehrere Phänomene, die den Innenraumkomfort beeinflussen, spielen sich jedoch an der Fassade ab, insbesondere bedingt durch die Fenster. Wie bereits gezeigt, ist die Wahrscheinlichkeit einer Übertemperaturhäufigkeit umso größer, je größer die Fenster sind.

Andererseits sorgen Fenster für visuellen Komfort durch die Versorgung mit Tageslicht und die visuelle Verbindung zur Außenwelt. Je geringer die Fenstergröße ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass einige Bereiche des Raumes besonders in den Herbst- und Wintermonaten nicht ausreichend mit Tageslicht versorgt werden. Mittels einer Tageslichtanalyse können die unteren Grenzen bei der Wahl der Fenstergröße für den gleichen Raum im Rahmen einer Analyse bestimmt werden.

Die Anforderungen an die Tageslichtversorgung in Innenräumen sind in den Normen für Arbeitsräume unter anderem mit definierten Werten für die Beleuchtungsstärken vorgegeben, jedoch sind verbindliche Anforderungen für Wohngebäude weniger klar definiert. Die Bayerische Bauordnung gibt seit Jahren nur eine einfache Berechnungsformel vor, wonach die Fenstergröße eines Aufenthaltsraums mindestens $1/8$ (= 12,5 %) der Netto-Grundfläche des Raumes betragen muss. (Bay BO Art. 45 Abs. 2) Diese Vorgabe gewährleistet allerdings keine ausreichende Tageslichtversorgung in tiefen Räumen. Zudem werden geometrisch ungünstige Räume nicht berücksichtigt. Wenn also zunehmend Homeoffice-Arbeitsplätze entstehen, werden dort in Zukunft dieselben Anforderungen gelten, die auch sonst an Arbeitsplätze gestellt werden.

Im deutschen Normenkatalog gibt es zwei Normen, die Methoden und Schwellenwerte für das Erreichen von psychischem Wohlbefinden in Form von visuellem Komfort festlegen. Hierfür spielt insbesondere der

Tageslichtquotient eine entscheidende Rolle. Dieser wird definiert als das Verhältnis zwischen der Beleuchtungsstärke in Innenräumen auf einer bestimmten horizontalen Ebene und der vorhandenen horizontalen Beleuchtungsstärke im Freien auf einer horizontalen Ebene ohne Verschattungseinflüsse. Für die Berechnung wird ein bedeckter Himmel mit einer diffusen horizontalen Beleuchtungsstärke von ca. 14.000 lx für Deutschland angenommen. (DIN EN 17037, 2019). Die wichtigsten Grenzwerte dieser Normen werden im Folgenden kurz erläutert.

DIN 5034-1 Tageslicht in Innenräumen:

- Tageslichtquotient $D > 0,9 \%$ als Mittelwert aller Punkte in mittlerer Raumtiefe auf der horizontalen Bezugsfläche (in 0,85 m Höhe über dem Fußboden) und $D > 0,75 \%$ als niedrigster gemessener Wert. Dies gilt für Räume mit Fenstern an einer Fassadenaußenwand.
- Bei Räumen mit Fenstern an zwei Fassaden muss der Tageslichtquotient in allen Punkten der oben genannten Bezugslinie der Messebene in 0,85 m Höhe über dem Fußboden $D > 1 \%$ sein.

DIN EN 17037 Tageslicht in Gebäuden:

- In dieser wird die Verwendung von Tageslichtsimulationen über ein ganzes Jahr vorgeschlagen, um alle Belichtungssituationen abzudecken. Dies wird vorausgesetzt, um eine bestimmte Komfortkategorie hiernach erreichen zu können.
- Ein alternativer Ansatz, der auf dem Tageslichtfaktor basiert, wird in der Norm ebenfalls vorgeschlagen. Zwei Mindestrandbedingungen müssen gleichzeitig erfüllt werden: Ein angemessenes Beleuchtungsniveau ist erreicht, wenn der Tageslichtfaktor $D > 2,2 \%$ auf einer horizontalen Fläche in 0,85 m Höhe über dem Fußboden in 50 % der Raumfläche beträgt und ein Tageslichtfaktor $D < 0,7 \%$ für 95 % der Raumfläche. Diese Werte korrelieren in etwa mit Beleuchtungsstärkewerten von 300 lx bzw. 100 lx, sie werden als unterste Kategorie in einer 3 stufigen Kategorisierung in dieser Norm verwendet.
- Wenn die Zielwerte dieser Norm erreicht werden, sind automatisch auch die Anforderungen der DIN 5034-1 erfüllt.

Sobald demnach neue Homeoffice-Arbeitsplätze entstehen, muss in Abhängigkeit des Fensterflächenanteils eine ausreichende Tageslichtversorgung gewährleistet werden. Beispielhaft wird das Eckzimmer mit verschiedenen grundflächenbezogenen Fensterflächenanteilen bei einer Raumhöhe von 2,8 m untersucht. Zu erwartende grundflächenbezogene Fensterflächenanteile sind zwischen etwa 14 % und 30 % zu erwarten. Damit wird lediglich gezeigt, welcher Einfluss in diesem Zusammenhang auch für zukünftige Planungen berücksichtigt werden muss (Abb. 65).

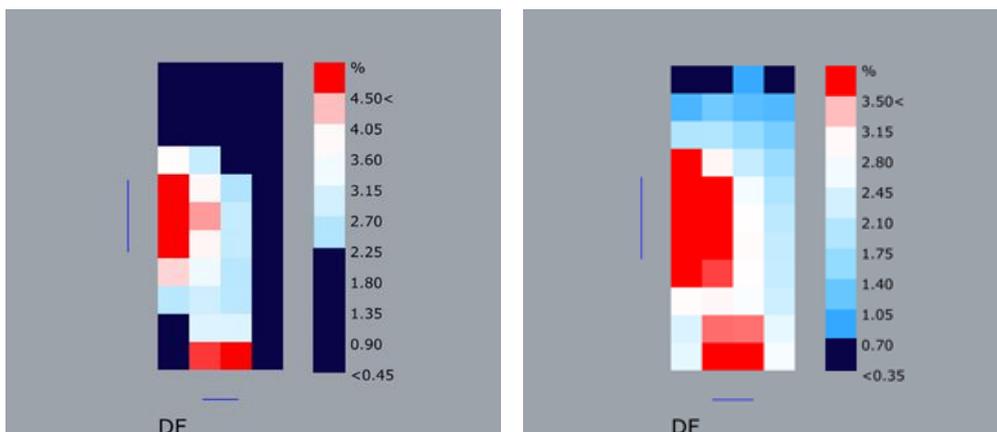


Abbildung 65: Fensterflächenanteil $f' = 14 \%$ und $f' = 30 \%$ mit Tageslichtquotienten von $>2,2 \%$ für mehr als 50 % der Grundfläche und Tageslichtquotient $0,9 \%$ für mehr als 95 % der Grundfläche (DF = Daylight Factor = Tageslichtquotient)

Fazit zur Auswahl repräsentativer Varianten

Im Hinblick auf die kommenden klimatischen Veränderungen existieren politische und ökologische Präferenzen für Baumaterialien. Es wurden typische Konstruktionen ausgewählt und mittels Simulationen berechnet. Auswertungen der Ergebnisse in Form von Liniendiagrammen zeigen, dass je nach architektonischen Vorgaben bei verschiedenen Bauweisen unterschiedliche Spielräume hinsichtlich der Fassadengestaltung vorliegen.

Gewisse Leistungsunterschiede entstehen durch verschiedene Bauweisen, was sich im Sommer in Bezug auf machbare Fensterflächenanteile zeigt. Die zugehörigen Parameter haben einen großen Einfluss auf die sommerliche thermische Behaglichkeit (Kapitel 8.2), sie können und sollten während der Entwurfsphase angepasst werden.

Die Übertemperaturhäufigkeit wird durch die Fensterflächenanteile, die Sonnenschutzmaßnahmen und die Rohdichte der Außenwand – in dieser Reihenfolge - signifikant beeinflusst. Außenwände mit mittlerer und hoher Dichte (größer als 1200 kg/m^3) erzeugen jedoch keine großen Unterschiede, können aber gegenüber Leichtbauten und Konstruktionen mit massiven Konstruktionen mit niedrigen Rohdichten (600 kg/m^3) Vorteile einbringen.

Ein großer Fensterflächenanteil erfordert besondere Aufmerksamkeit hinsichtlich der sommerlichen Behaglichkeit. Wohngebäude ohne externe Beschattungssysteme sollten mit einem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil kleiner als ca. 25 % geplant werden. Ein Fensterflächenanteil von 25 % ohne Sonnenschutz bedeutet im Umkehrschluss jedoch auch, dass entweder eine Außenwanddichte von mehr als 1200 kg/m^3 oder aktive Kühlsysteme erforderlich sind, um thermisches Unbehagen im Sommer zu vermeiden. Dies gilt selbst dann, wenn deutlich höhere nächtliche Luftwechselraten angesetzt werden, als normativ vorgegeben ($n = 5,0 \text{ h}^{-1}$ in den gezeigten Berechnungen gegenüber normativ $n = 3,0 \text{ h}^{-1}$). Weitere Erhöhungen der nächtlichen Luftwechselraten sind kaum standardmäßig für Wohngebäude zu realisieren, wenn Schallschutzanforderungen in Kommunen bei Fensterlüftung erfüllt werden müssen. Mechanische Lüftungsanlagen sind meist nicht auf so hohe Luftwechselraten ausgelegt, da sonst meist unbehagliche Zugscheinungen bis hin zum vermehrten Auftreten von Erkältungskrankheiten möglich werden.

Energiebedarf und Sektorkopplung

Wie bereits erwähnt, wird das Ziel, die vom Bausektor verursachten Umweltauswirkungen zu verringern, durch aktuelle politische Maßnahmen eindeutig unterstützt. Nach dem Pariser Abkommen hat sich Deutschland zur Klimaneutralität des Gebäudesektors bis 2050 verpflichtet. Verbesserungen in der Energieversorgungskette sowie optimierte (Heiz-)Systeme sind besonders relevant, aber nicht die einzige Maßnahme, auf welcher der alleinige Fokus liegen sollte. Auch der sommerliche Wärmeschutz spielt nicht nur für den thermischen Komfort, sondern auch für den Energiebedarf eine wichtige Rolle und dies wird zukünftig (Klimawandel, vermehrt Homeoffice) eine immer größere Bedeutung erlangen.

Nach dem zuvor dargestellten Szenario mit jährlich steigenden Sommertemperaturen wird die Einführung von Kühlsystemen in Wohnhäusern bei den heute üblichen großen Fensterflächenanteilen immer wahrscheinlicher und dieses Kapitel befasst sich mit dem möglichen Einsatz aktiver Kühlsysteme. Der nachträgliche Einbau solcher aktiver Systeme bzw. die Ausstattung von neuen Wohngebäuden mit zusätzlichen aktiven Kühlsystemen inklusive Rohrleitungssystemen erscheint jedoch wirtschaftlich nicht darstellbar zu sein. Beim Wohnungsneubau gäbe es hingegen eine möglich sinnvolle Lösung in Form von Wärmepumpen, die im Sommer im Umkehrbetrieb als Kühlanlage wirken. Damit wären keine zusätzlichen anlagentechnischen Komponenten notwendig. Es existieren hierfür auch andere technische Lösungen, für die Untersuchung im Sinne einer Sektorkopplung wird hier jedoch nur exemplarisch diese eine Variante diskutiert. Falls in Zukunft in großem Umfang Kühlenergie auch für Wohngebäude verwendet wird und gleichzeitig zunehmend regenerative fluktuierende Energie im Stromnetz vorhanden ist, könnte eine direkte Kopplung von hohen sommerlichen Energie-Kapazitäten mit der aktiven Kühlung von Gebäuden netzstabilisierende Effekte erzeugen (Lücking und Hauser, 2011). Zudem können thermische Speicherkapazitäten von Gebäuden auch im

Winter genutzt werden, beispielsweise um niedrigere Energieverbräuche am Wochenende abzupuffern, da viele Industrie und Gewerbebetriebe dann weniger Energie benötigen. Abb. 66 zeigt die zu erwartende Entwicklung in Deutschland bezüglich der Energiegewinnung über regenerative Quellen.

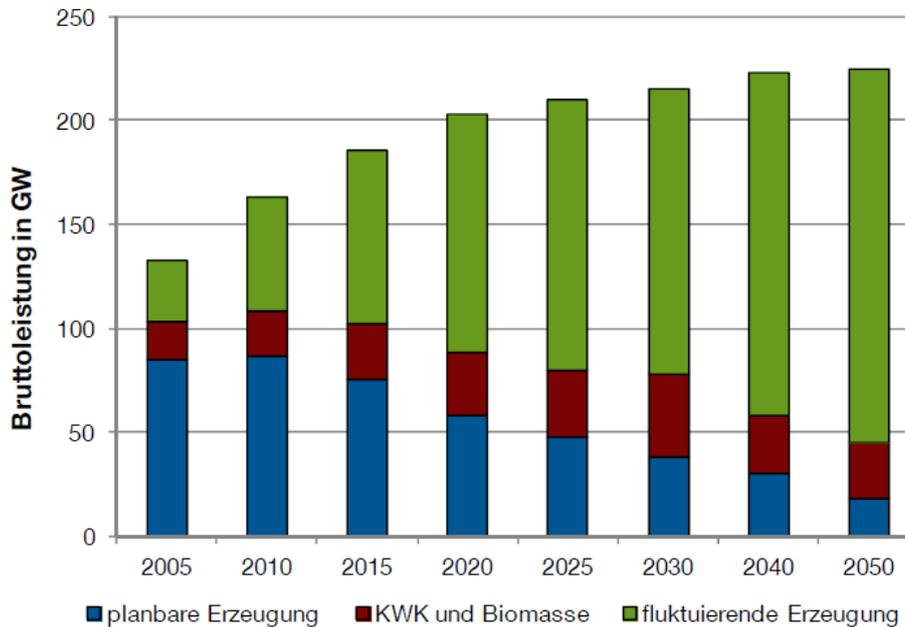


Abbildung 66: Entwicklung der Kraftwerksleistung in Deutschland (Nietsch, et.al., 2012)

Die neuen Herausforderungen ergeben sich aufgrund der zunehmenden Anteile erneuerbarer Energien für die Konditionierung von Gebäuden. Einem größer werdenden Anteil schwankenden Angebots an elektrischem Strom steht ein kleiner werdender Anteil planbaren Angebots gegenüber. In diesem Zusammenhang sind alle thermischen Speichermassen von Vorteil, wenn ein zugehöriges Lastmanagement etabliert wird. Konkret bedeutet das, dass während eines hohen Angebots möglichst viele thermische Speicher gefüllt werden, was mittels hoher thermischer Speicherkapazitäten in Gebäuden angestrebt werden kann.

Die Umsetzung des Lastmanagements in Gebäuden wird sowohl von der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) als auch von den bauphysikalischen und bauelementbezogenen Eigenschaften bestimmt. Aufgrund des Umfangs und der Komplexität des Lastmanagements wird in diesem Forschungsprojekt das Thema durch die Untersuchung des Energiespeicherpotenzials nur mit Bezug auf zugehörige Quellen wiedergegeben. Die Speicherung kann entweder durch herkömmliche Wärmespeicher, wie z. B. Wassertanks, oder durch die Nutzung der Gebäudemasse als Speicher gedeckt werden. Hierzu wurden bereits umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, die in der Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für Gebäude mündeten (Kornadt, et.al., 2019). In Zeiten hoher Residuallast, dem Unterschied zwischen Energiebedarf und erneuerbarer Energieerzeugung, könnte die Gebäudestruktur durch die Speicherung von Wärme eine wichtige Rolle spielen. Dieser Aspekt kann in Zeiten, in denen der Energieüberschuss verschwindet, zu potenziellen Energieeinsparungen führen, was sich unter dem Begriff der zeitlichen Flexibilität der Wärmeerzeugung zusammenfassen lässt, siehe u.a. (Auer, et.al. 2017) und (Hausladen, 2014).

Tragfähigkeit, Schallschutz und weitere Parameter

Neben den thermischen Effekten bei der Verwendung von Bauweisen mit verschiedenen Rohdichten, treten auch Veränderungen an anderen wesentlichen Parametern auf. Von besonderem Interesse sind hierbei Tragfähigkeit und Schallschutz. Die Ergebnisse hierzu werden insbesondere bei der Präsentation in Form eines einfachen Demonstrators (siehe Kapitel 9) verwendet.

Die Abbildung 67 zeigt exemplarisch am Beispiel der Druckfestigkeit, welche Effekte dabei entstehen. Alle Datenanalysen fußen auf eigenen Recherchen unter Verwendung folgender Quellen:

- Wärmetechnische Kenngrößen: Zhou, Carmeliet & Derome (2018), Sassine et al., (2020) und Maier (2022)
- Feuchtetechnische Kenngrößen: Zirkelbach (2001), WUFI-Datenbank, Willems, Schild & Stricker (2018)
- Akustische Kenngrößen: Gierga & Staniszewski (2016)

Als weitere allgemeine Quellen dienen Willems, Schild & Stricker (2019), Kummer (2017), DIN 4108-3 (2018) und Albert, Bergner & Berner (2018).

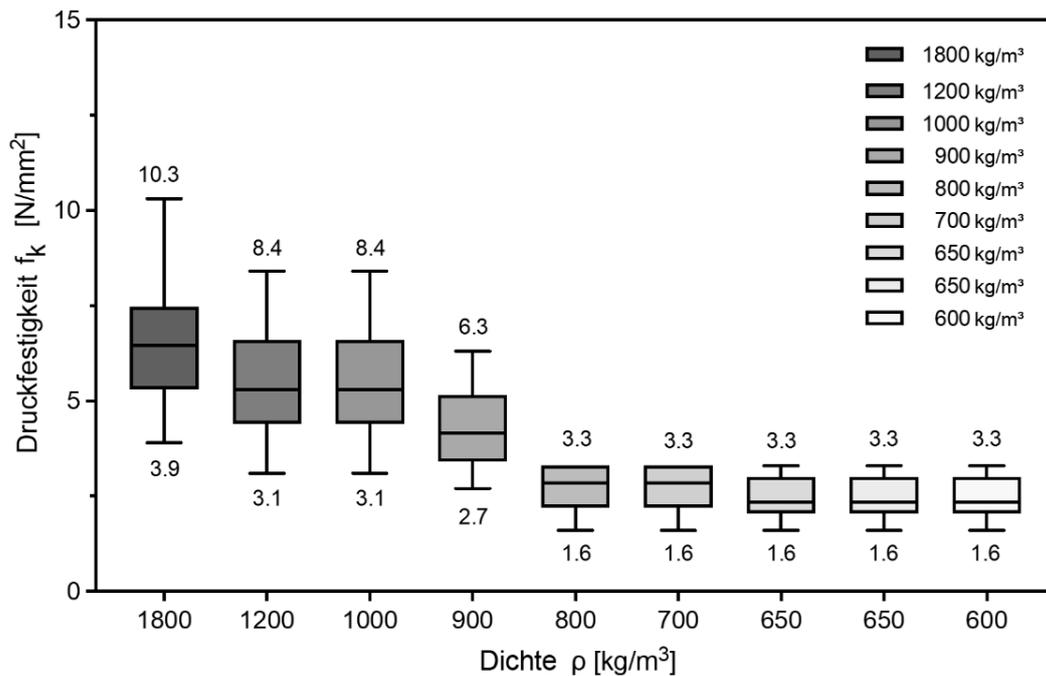


Abbildung 67: Druckfestigkeit mineralischer Baustoffe für Außenwände am Beispiel von Ziegelwand-konstruktionen in Abhängigkeit der Rohdichte (Albert, Bergner & Berner, 2018)

Die Abhängigkeiten weiterer konstruktiv wichtiger Parameter erfolgte in ähnlicher Art und Weise. Zusammenfassend werden die zugehörigen Parameter in Tabelle 11 angegeben. Zur Ermittlung der Werte wurde auf Studien zurückgegriffen, in denen Daten nach Baualterklassen (BK) vorliegen.

Tabelle 11: Rohdichteabhängige Parameter als Mittelwerte nach Baualtersklassen sortiert

Baualter-klasse	ρ [kg/m ³]	m' [kg/m ²]	R_w [dB]	U-Wert [W/(m ² K)]	μ -Wert [-]	w-Wert [kg/(m ² √h)]	f_k [N/mm ²]
BK 04 (1949-1957)	1800	540	63,2	1,7	5	17,4	6,54
BK 05 (1958-1968)	1200	360	58,2	1,3	5	8,9	5,43
BK 06 (1969-1978)	1000	300	56,1	1,2	5	n.v.	5,43
BK 07 (1979-1983)	900	329	52,0	0,82	5	7,4	4,31
BK 08 (1984-1994)	800	292	50,6	0,64	5	n.v.	2,71
BK 09 (195-2001)	700	256	49,5	0,58	5	n.v.	2,71
BK 10 (2002-2009)	650	237	45,5	0,49	5	5,82	2,45
BK 11 (2010-2015)	650	237	45,5	0,26	5	5,82	2,45
BK 12 (> 2016)	600	219	41,6	0,21	5	5,7	2,45

BK = Baualterklasse; n.v = keine Daten vorhanden

Zudem folgt die Darstellung in Form einer Sensitivitätsanalyse – ausgehend von einer mittleren Rohdichte von 1200 kg/m³ – wiedergegeben in Abbildung 68. Dabei gilt zu beachten, dass die Sensitivitäten bei anderen Werten für die Rohdichte nicht die Gleichen sind.

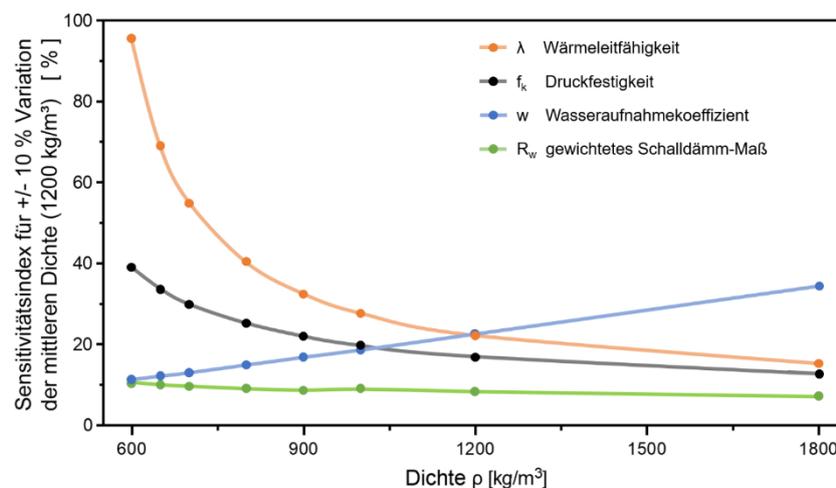


Abbildung 68: Sensitivitätsindex für Variationen von +/- 10 % der mittleren Rohdichte (1200 kg/m³) für Wärmeleitfähigkeit, Druckfestigkeit, Wasseraufnahmekoeffizient und gewichtetes Schalldämm-Maß.

Im Zusammenhang mit den aus den thermischen Simulationen ermittelten Daten wird ein einfaches Anwendungstool entwickelt, das die wesentlichen Erkenntnisse zusammenfassend wiedergibt. Damit soll erreicht werden, dass bei der Wahl eines bestimmten rohdichteabhängigen Parameters typischerweise damit im Zusammenhang stehende weitere Parameter mit dargestellt bzw. ausgegeben werden.

Ökobilanz

Neben den bereits genannten Unterschieden, die beim Einsatz von Bauweisen mit unterschiedlichen Dichten bei Außenwandkonstruktionen entstehen, wird abschließend noch eine Abschätzung hinsichtlich ökobilanzieller Effekte gezeigt. Hierbei gilt zu beachten, dass alleine durch die Wahl unterschiedlicher Konstruktionsprinzipien, durchaus große Einflüsse auf Ökobilanzen entstehen können. Beispielsweise können Fassaden aus Leichtbauelementen mit Stahlbetondecken und aussteifenden Stahlbetontreppenhaukernen kombiniert werden, ebenso können massive Außenwandkonstruktionen mit Massivholzdecken kombiniert werden, was dann im Zweifel keine Aussagefähigkeit bezüglich der ökobilanziellen Unterschiede bei Fassadenkonstruktionen zulässt. Daher wird zunächst nur gezeigt, welche Auswirkungen für die bereits genannten Fassadenkonstruktionen pro Quadratmeter Fassade entstehen, da dies objektiv vergleichbar ist. Als wesentliche Größe kann dafür das Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP) als Kilogramm CO₂-Äquivalent pro Quadratmeter und Jahr angegeben werden. Dies wird standardmäßig auf eine Lebensdauer von 50 Jahren bezogen. Das CO₂-Äquivalent wird über den gesamten Lebenszyklus auf der Grundlage zugehöriger Datenbanken dargestellt - in diesem Fall der Ökobaudat vom Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB, 2023).

Die vorgestellten Konstruktionen stellen repräsentative Aufbauten verschiedener Rohdichteklassen dar, mit dem Ziel energetische Effekte auch im Sinne von Zukunftsszenarien abzubilden. Sie wurden nicht zur Optimierung der Vergleichbarkeit für ökobilanzielle Aussagen erstellt, deswegen finden sich in den Bilanzen auch unterschiedliche Materialien, die jeweils einen bestimmten Wärmeschutz hervorrufen. Dennoch bieten die GWP-Summen in Abbildung 69 einen Eindruck, welche typischen Ergebnisse bei der Wahl typischer Fassadenkonstruktionen zu erwarten sind. Es zeigt sich, dass Leichtbaukonstruktionen aus Holz hierbei Vorteile gegenüber Massivbauweisen besitzen.

Unter der Annahme, dass Außenwände im Mittel einen Anteil von etwa 15 % am gesamten GWP des Gebäudes besitzen (Braune, 2022), ergeben sich etwa folgende Anteile am GWP für die untersuchten Außenwandkonstruktionen: 7 % (AW0), 11 % (AW1), 23 % (AW2) und 19 % (AW3). Bezüglich einer Reduktion der grauen Energie muss der Fokus weiterhin auf der Reduktion von Stahlbetonanteilen liegen. Das bedeutet, dass sowohl für Leichtbauten als auch für massiven Bauweisen in Zukunft Deckenkonstruktionen aus Holzdecken oder neue Betondecken mit deutlich vermindertem CO₂-Äquivalent zu empfehlen sind.

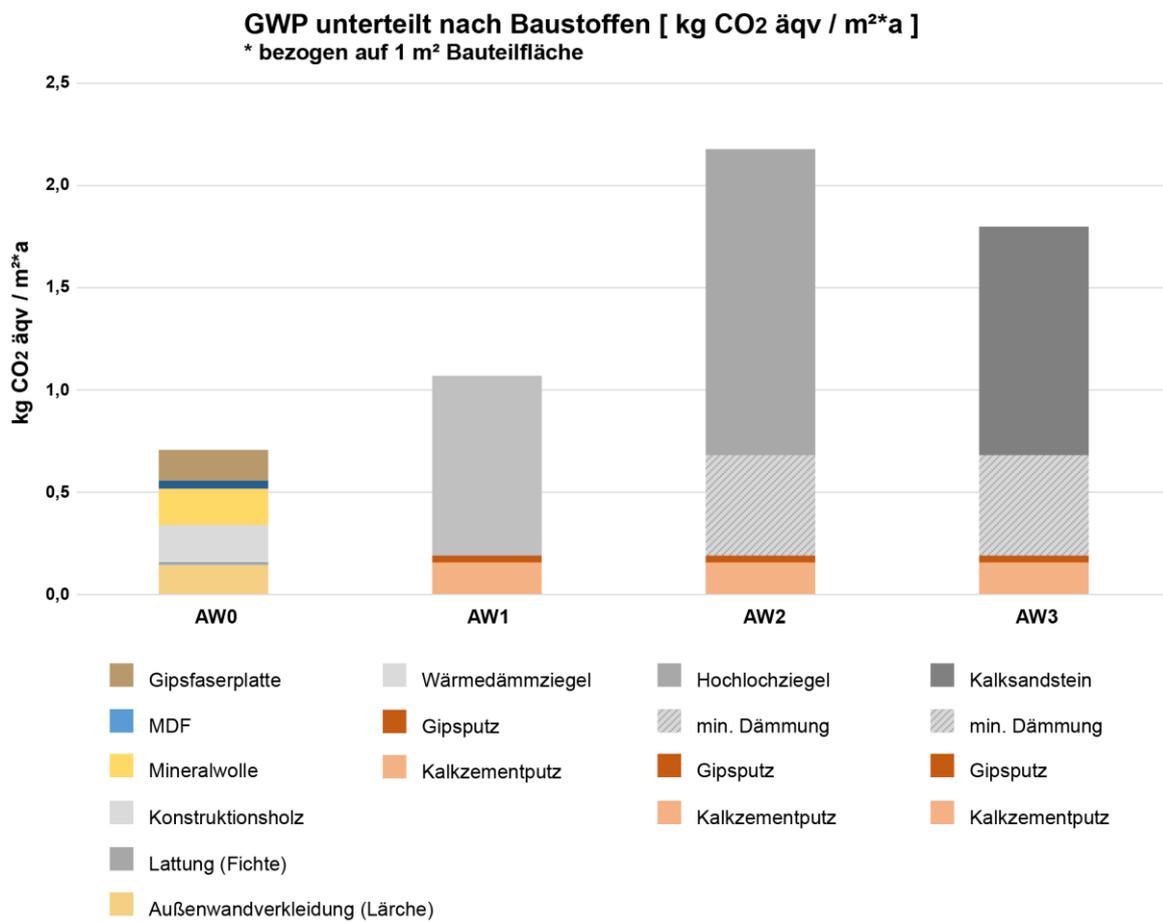


Abbildung 69: Ökobilanzen der untersuchten Fassadenkonstruktionen, CO₂-Äquivalente (Phase A bis C).

Demonstrator

Neben den Analysen und Bewertungen der erzielten Ergebnisse wird ein einfaches Auswahl- und Entscheidungswerkzeug für verschiedene Bauweisen unterschiedlicher Rohdichten in Form eines Demonstrators vorgestellt. Das Ziel dabei ist es, die berechneten Ergebnisse für den sommerlichen Wärmeschutz mit den zusätzlichen Angaben wichtiger Kenngrößen massiver Bauweisen so zu kombinieren, dass für einen Nutzer die wichtigsten Eigenschaften übersichtlich dargestellt werden können. Dieses Prinzip lässt sich noch für weitere Eigenschaften der vorgestellten Baustoffe erweitern, zeigt aber schon in der vorliegenden Version Zusammenhänge, die bei der Materialwahl konkreter Bauvorhaben besonders hilfreich sein können. Wie zuvor erwähnt, sind die Effekte für den winterlichen Wärmeschutz kaum rohddichteabhängig, somit entsteht hieraus keine Notwendigkeit dies in gleicher Form darzustellen.

Für die rohddichteabhängigen Effekte bezüglich des sommerlichen Wärmeschutzes wird dies mittels einer entsprechenden Anwendung gezeigt. Das Interface zu Bedienung sowie der Ergebnisdarstellung ist entsprechend der Darstellung in Abbildung 70 aufgebaut. Beim Leichtbau können nicht alle Werte in pauschaler Form wie bei den Massivbauweisen angegeben werden, da sie in besonderem Maß von konstruktiven Details abhängen.

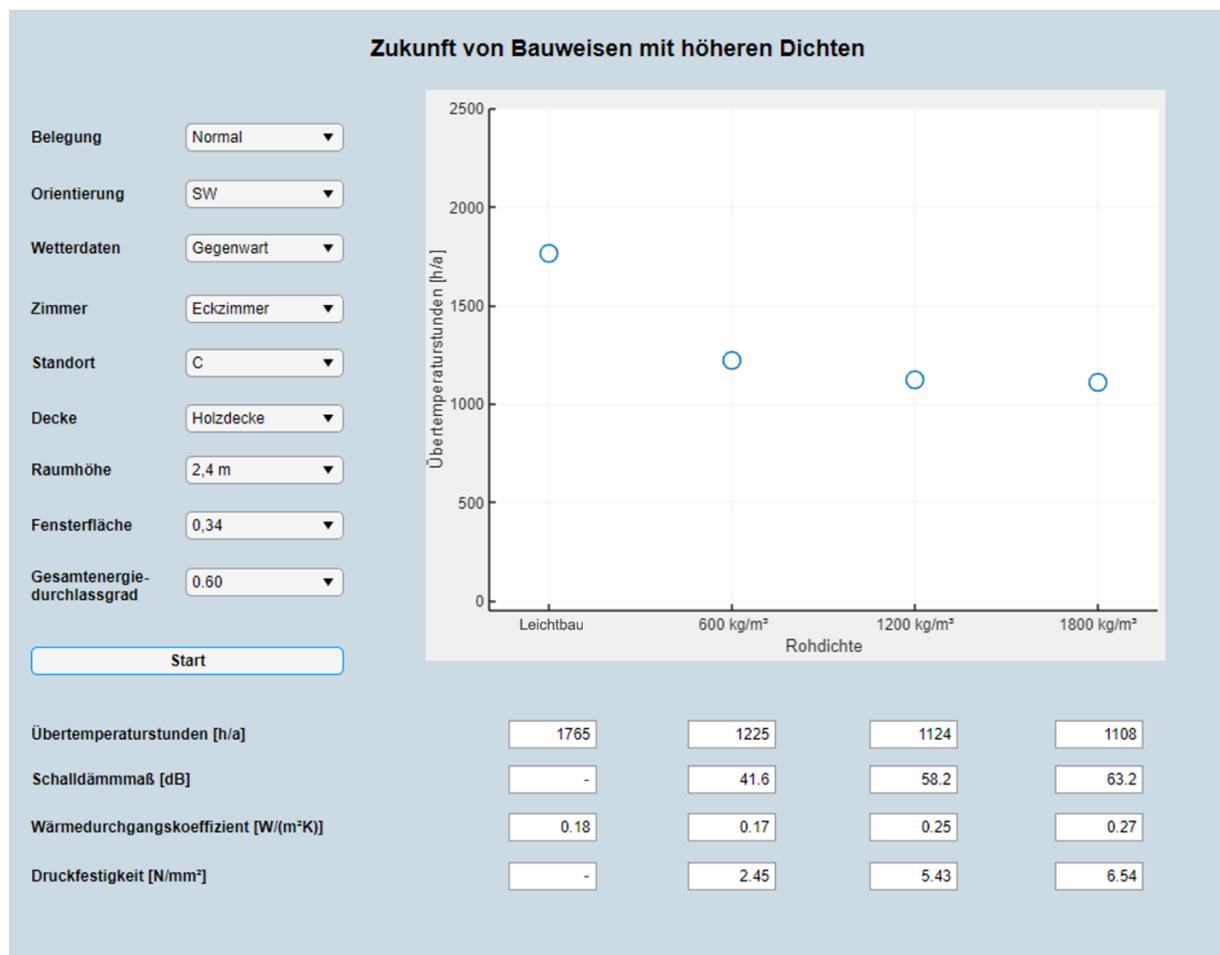


Abbildung 70: Darstellung des Aufbaus und der Ergebnispräsentation im Demonstrator

Der Demonstrator zeigt die Ergebnisse für den sommerlichen Wärmeschutz anhand der berechneten Übertemperaturstunden [h/a] für die vier möglichen Bauweisen (Leichtbauweise, Massive Bauweisen mit einer Rohdichte von 600 kg/m^3 , 1200 kg/m^3 und 1800 kg/m^3) an. Dadurch können auf einfache grafische Art und Weise auch Zwischenwerte interpoliert bzw. abgeschätzt werden. Die Ergebnisse lassen sich für alle 17.280 simulierten Varianten darstellen und die Auswahl der jeweiligen Parameter erfolgt anhand von Dropdown-Menüs, welche auf der linken Seite neben dem Ergebnisdiagramm abgebildet sind. Somit können sämtliche Parameter, die bereits in der Variantenmatrix abgebildet wurden, mit dem Demonstrator dargestellt werden. Hierbei handelt es sich um die Belegung des Raumes, die Orientierung, die zugrundeliegenden Wetterdaten, das Zimmer, den Standort, die Bauweise der Innenraumdecke, die Raumhöhe, die grundflächenbezogene Fensterfläche und den Gesamtenergiedurchlassgrad. Dabei wird die Art der Verglasung, welche in der Variantenmatrix aufgeführt ist anhand des Gesamtenergiedurchlassgrades berücksichtigt.

Wurden sämtliche Eigenschaften der zu bewertenden Parameterkombination ausgewählt, wird der Demonstrator über die zugehörige Schaltfläche gestartet. Daraufhin erscheint auf der rechten Seite ein Diagramm mit der Darstellung der Übertemperaturstunden. Zusätzlich werden darunter die Übertemperaturstunden mit ihrem konkreten Zahlenwert, welcher sich aus den Simulationen ergeben hat, abgebildet. Zudem werden für die Rohdichteklassen das zu erwartende Schalldämmmaß [dB], der Wärmedurchgangskoeffizient [$\text{W/m}^2\text{K}$] und die Druckfestigkeit [N/mm^2] als wesentliche zugehörige Entwurfsparameter angegeben. Bei diesen drei Werten handelt es sich nicht um Werte aus den Simulationen, sondern Werte, die der einschlägigen Literatur entnommen wurden. Anzumerken ist dabei, dass einige zugehörige Werte für die Leitbauweise ohne Wert ausgegeben werden (-), da sie stark von konstruktiven Fügungen abhängen und nicht einfach einer Rohdichte(klasse) zugeordnet werden können, wie das bei massiven Bauweisen eher der Fall ist.

Fazit und Ausblick

Das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war die Untersuchung der thermischen Speichermassen von Bauweisen mit höheren Rohdichten hinsichtlich des winterlichen und sommerlichen Verhaltens auch für Zukunftsszenarien sowie deren Bewertung bezüglich weiterer Parameter wie dem Schallschutz und der Tragfähigkeit. Zudem sollten weitere zugehörige Aspekte wie die Nutzbarkeit thermischer Speichermasse bei zunehmend fluktuierenden regenerativen Energiequellen und ökobilanzielle Aspekte erörtert werden.

Die Ergebnisse sollen als Grundlage für ein Bewertungs- und Auswahlssystem dienen, welches standortabhängige Lösungen hervorhebt. Zur Umsetzung dieser Zielstellung wurden geeignete Standorte und klimatische Bedingungen definiert. Als Mustergebäude wurde ein kleines Mehrfamilienhaus gewählt, welches den deutschen Mietwohnungsbau sinnvoll abbildet und mit Einschränkungen neben Wohnnutzungen auch für Büro- oder Mischnutzungen verwendet werden kann. Gegenwärtige Bedingungen und Bedingungen eines zukünftigen Klimas wurden verwendet.

Bewertung der Methodik

Es wurden zunächst Simulationen für eine reduzierte Variantenmatrix (siehe Abbildung 31) und im Anschluss für insgesamt 17.280 Varianten durchgeführt, bevor die Ergebnisse bewertet wurden. Über den winterlichen Wärmeschutz entstehen keine Ergebnisse, die darauf schließen lassen, dass einer Bauweise besondere Vor- oder Nachteile zuzuordnen wären. Wesentlich ist hier die energetische Qualität der Gebäudehülle, die mittels der bekannten Kenngröße H_T' gut abgebildet werden kann. Dafür werden die Bauteilflächen, Temperaturkorrekturfaktoren und U-Werte sowie der Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} herangezogen. Sie dient sinnvollerweise auch als Nebenanforderung für Wohngebäude im Rahmen des Gebäudeenergiegesetzes. Einzig für die dort verwendeten Vorgaben hinsichtlich der Wärmebrücken-zuschläge kann angemerkt werden, dass Vereinfachungen hierbei möglich und gegebenenfalls auch notwendig sind. Die Ergebnisse zum Energiebedarf im Winter reihen sich in andere wissenschaftliche Untersuchungen zum gleichen Thema ein. Bei der Analyse des sommerlichen Wärmeschutzes entstehen hingegen Abhängigkeiten von der Schwere der Bauweise insbesondere dann, wenn künftig andere klimatische Bedingungen herrschen. Die wichtigsten Parameter sind dabei der Fensterflächenanteil, der Sonnenschutz und die Schwere der Bauweise, wobei bereits mit etwas höheren, realistischen und damit für alle Bauweisen günstigeren nächtlichen Luftwechselraten gerechnet wurde, als dies normativ vorgegeben ist. Falls tatsächlich, wie bisher üblich, auch zukünftig für den Geschosswohnungsbau keine Sonnenschutzeinrichtungen verwendet werden, können mit schweren Bauweisen etwas größere Fensterflächenanteile realisiert werden. Thermische Speichermasse kann allerdings auch über massive Innenbauteile, Phasenwechselmaterialien oder anlagentechnische Komponenten realisiert werden, was jedoch meist zusätzliche Kosten und zusätzlichen Materialaufwand bedeutet.

Obwohl im Rahmen der Studie mehrere tausend Varianten berechnet wurden, existieren weitergehende Fragen, die hier noch nicht im Detail untersucht werden konnten. Von besonderem Interesse sind daher weitere Lüftungsstrategien, andere Verschattungsstrategien und Kühlung ohne großen primär-energetischen Aufwand (u.a., Bauteilaktivierung mit Wärmepumpe im Umkehrbetrieb, Brunnenkälte, etc.) sowie vertiefte gesamtheitliche Betrachtungen bezüglich Lebenszyklusanalysen und Effekten auf die Sektorkopplung zwischen regenerativer Energieerzeugung und dem Gebäudesektor. Außerdem müssten noch weitere Raumgeometrien und ganze Gebäude mittels Simulationen untersucht werden, um tatsächlich allgemeingültige Aussagen zum winterlichen und zum sommerlichen Verhalten treffen zu können.

Validität der Ergebnisse

Die Rohdichte verschiedener Außenwandkonstruktionen beeinflusst relevante bauliche Kenngrößen. Mittels des beschriebenen Demonstrators wird das zunächst für einige wenige Kenngrößen gezeigt. In Zukunft kann

dies noch um weitere Parameter ergänzt werden, welche allerdings auch nicht ausschließlich von der Rohdichte abhängig gemacht werden können. Viele heutige Baukonstruktionen sind deutlich komplexer sowohl in Bezug auf die Anzahl der Schichten flächiger Bauteile als auch bezüglich der zugehörigen Anschlussdetails. Daher müssen viele Parameter und Verbindungsmittel mit in die Überlegungen einbezogen werden, was dann vielleicht eher im Sinne einfacher Konstruktionen zu einem gesamtheitlich betrachteten Optimum führt. Als Anregung hierfür wird das Projekt „Einfach Bauen“ der Technischen Universität München erwähnt, dessen Grundidee genau darauf ruht (Nagler, 2019).

Die Ergebnisse, die mittels thermischer Simulationen ermittelt wurden, hängen immer von der Qualität der erstellten Modelle und von den Berechnungsverfahren ab. Hierzu gibt es jedoch viele Validierungen und Vergleiche mit unterschiedlichen Programmen, so dass ohne Einzelnachweise zu benennen davon ausgegangen werden kann, dass hier valide Ergebnisse erzielt wurden. Dabei gilt zu beachten, dass die Verluste und Gewinne über Transmission und die Berechnungen der Wärmeströme und thermischen Speichereffekte in Außen- und Innenbauteilen per se einfach zu berechnen sind. Im Gegensatz dazu sind Lüftungswärmeverluste und -gewinne, die bei modernen Gebäuden in etwa in gleicher Größenordnung vorliegen wie die Transmissionswärmeverluste und -gewinne, stark nutzerabhängig. Ebenso nutzerabhängig sind die internen Lasten und die Wahl individueller Innenraumtemperaturen. Dadurch können hier zunächst nur Ergebnisse miteinander verglichen werden, die ein (hoffentlich) realistisches Nutzerverhalten abbilden. Im Sinne der Ergebnisvergleichbarkeit wurden deswegen hier normative Vorgaben ohne Varianzen thermisch wirksamer Parameter angesetzt.

Hinweise für möglich normative Vorgaben und Vereinfachungen

Einige normative Vorgaben zum Nutzerverhalten haben erheblichen Einfluss auf den Heizenergie- und den Kühlenergiebedarf von Gebäuden. Leider werden bisher meist starre Werte dafür angesetzt beispielsweise $45 \text{ Wh/m}^2\text{d}$ für kleine Wohngebäude bzw. $90 \text{ Wh/m}^2\text{d}$ für größere Wohngebäude für interne Lasten oder $1,0 \text{ h}^{-1}$ Luftwechselrate dauerhaft im Sommer bzw. $3,0 \text{ h}^{-1}$ Luftwechselrate nachts, wenn Überhitzungen drohen (DIN V 18599, DIN 4108-2). Damit werden Heiz- und Kühlenergiebedarfe teilweise auf bis zu vier signifikante Stellen berechnet z.B. $123,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ was bezüglich realistisch anzusetzender Unsicherheiten unmöglich ist. Ebenso werden veraltete äußere Randbedingungen (Potsdam 2010, Heizenergiebedarf) angesetzt, obwohl bei einer prognostizierten Lebensdauer von 50 Jahren für Neubauten deutlich wärmere Bedingungen realistisch wären. Zudem werden Standortunterschiede nicht ausreichend berücksichtigt (Winter und Sommer), was bestimmte regionale und lokale Gegebenheiten wie Verschattungen durch Terrain oder Südhanglagen betrifft. Während bei Heizungsauslegungen mit lokalen Gradtagzahlen gearbeitet wird, scheint das bei Heizenergiebedarfsberechnungen nicht notwendig zu sein, obwohl seit langem bekannt ist, dass allein durch Standortunterschiede $\pm 20 \%$ Unterschiede in Deutschland entstehen können. Ebenso können vollständig verschattete Gebäude bis zu 80% mehr Heizenergiebedarf aufweisen als unverschattete Gebäude (Hauser, 1992) – es entsteht zumindest die Vermutung, dass bei Energieausweisen nicht immer alle Verschattungen angegeben werden, um günstigere Ergebnisse zu erhalten. Für die Überhitzungen wird ein einfaches Verfahren nach DIN 4108-2 angewendet, darin werden aber nur die oben angegebenen $3,0 \text{ h}^{-1}$ als maximale Luftwechselraten angegeben und es wird keine Spezifikation zu tatsächlich aktivierbaren Speichermassen angegeben. So besitzen einige scheinbar schwere Bauweisen Konstruktionen, bei denen die schweren Bauteile z.B. durch Dämmstoffe vom Innenraumluftvolumen thermisch abgekoppelt sind. Genau dies geschieht, wenn Trittschalldämmungen verbaut sind und wenn Akustikpaneele aus Faserdämmstoff einen Wärmeaustausch mit einer Stahlbetondecke verhindern. Die Stahlbetondecke wirkt dann nicht mehr als thermischer Puffer. Es könnte hilfreich sein, dies normativ klarer zu definieren, da die vorhandenen Einteilungen üblicherweise nur mittels vorhandener Bauteilmassen in Kilogramm auf einen Quadratmeter Nutzfläche eines Raumes geschehen. Gleichzeitig wird nicht vermerkt, mit welchen, ggf. niedrigeren internen Lasten an heißen Tagen oder im Jahresverlauf zu rechnen ist. Die anzusetzenden internen Lasten werden als feste Größe für das ganze Jahr definiert.

Die Häufigkeit der Überschreitung der Übertemperatur in maximal 1% der Fälle nach DIN EN 16798 erscheint deutlich übertrieben und erzeugt unnötigerweise den Bedarf nach mechanischer Kühlung, was gegenwärtig den Klimaschutzzielen widerspricht. Es sollten Gebäude, die mit passiven Maßnahmen akzeptable Innenraumbedingungen über lange Zeiträume im Jahr generieren, bessergestellt werden.

Ohne zusätzliche Kühlmaßnahmen (auch ohne solche, die primärenergetisch günstig sind) zeigt sich, dass reine Leichtbauten mit Massivholzdecken und entsprechend niedrigen Anteilen grauer Energie gegebenenfalls schon bald Sonnenschutzmaßnahmen oder zusätzliche thermische Speicher benötigen, da sonst bald aktive Kühlung im Sommer benötigt wird. Bei Bauweisen mit höheren Dichten entsteht ein etwas größerer Spielraum hinsichtlich zusätzlicher Maßnahmen gegen Überhitzung.

Zielgruppenorientierte Bewertung und weitere Aspekte

Zukünftig könnten also Analysen, wie sie in diesem Projekt durchgeführt wurde, mit konkreten Methoden zum einfachen Bauen Lösungen bieten, die tatsächlich zu einem gesamtheitlichen Optimum führen. Dabei ist fraglich, ob dies energetisch für den Winterfall bis zum äußersten optimierte Häuser sind. Diese werden zum Teil mit äußerst aufwendigen Konstruktionen und Anlagen ausgeführt, die nur von spezialisierten Firmen auf- und wieder für eine stoffliche saubere Trennung abgebaut werden können. Ebenso können energetisch ungünstige Gebäude mit einem zu großen Energieverbrauch während der Nutzungsphase aber besonders einfacher Baukonstruktion, keine sinnvolle Lösungen darstellen. Gesamtheitliche Optima entstehen eher dort, wo jeweils verschiedene Teil-Ziele mittels geeignetem aber nicht übertrieben hohem Aufwand erreicht werden und diese Teil-Ziele sinnvoll miteinander kombiniert werden. Beispielsweise könnte man mit einem sehr guten aber keinem vollständig technisch ausgereizten Wärmeschutz, einer einfachen aber ebenfalls nicht technisch ausgereizten thermischen Solaranlage sowie freier Kühlung (Nachtlüftung) und ausreichend nutzbarer Speichermasse vielfach besonders wirtschaftliche Lösungen erzeugen. Dabei würden Bau- und Anlagenkonstruktionen zum Einsatz kommen, die einfach gewartet, repariert und wieder rückgebaut werden können.

Die Komplexität vieler Komponenten und Anschlussdetails hat mit zunehmenden Anforderungen an den Wärmeschutz ebenfalls zugenommen. Bauherren ohne baupraktische Kenntnisse können daher kaum noch überblicken, welche Bautechniken besonders geeignet und insbesondere hinsichtlich zukünftiger klimatischer Bedingungen zukunftssicher sind. Sie benötigen Entscheidungshilfen von Fachplanern und Architekten wie schon bisher. Gleichzeitig bilden Normen zur Energieeffizienz und Bewertungssysteme zum Nachhaltigen Bauen längst nicht alle bereits Realität gewordenen Randbedingungen ab. Es entstehen zum Teil Pseudogenauigkeiten bei Prognosen zu Energieverbräuchen und es fehlen Bewertungsmethoden zum Nachhaltigen Bauen mit realistischen äußeren Randbedingungen. Zudem wird Suffizienz als ein entscheidender Aspekt bei diesen Bewertungen nicht berücksichtigt. Wenn beispielsweise eine städtische Wohnung mit 72 Quadratmetern Nutzfläche von 4 Personen bewohnt wird bei gemessenen Verbräuchen von 180 kWh/m²a, dann entstehen bezogen auf eine Person 3.240 kWh/a. Ein neues Einfamilienhaus mit nur 40 kWh/m²a, 162 Quadratmeter Nutzfläche und 2 Bewohnern ergibt pro Person ebenfalls 3.240 kWh/a, wobei nur letzteres das GEG erfüllt und ggf. staatliche Förderungen möglich sind. Es zeigt sich, dass Belegungsdichten volkswirtschaftlich relevant sind, aber bei staatlichen Förderungen keine Berücksichtigung finden.

Hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes kann leider keine pauschale Prognose für Neubauten oder Modernisierungen angegeben werden. Es ist jedoch eindeutig, dass insgesamt höhere Temperaturen zu erwarten sind und die Anzahl an besonders warmen Tagen im Jahr in ganz Deutschland zunehmen wird. Ernsthafte Prognosen zu Übertemperaturstunden hängen jedoch in besonderem Maß vom Fensterflächenanteil, von Verschattung und Nachtlüftung in Kombination mit aktivierbarer Speichermasse ab. Der mitentwickelte Demonstrator kann allerdings für Planer und Energieberater gute Dienste leisten, da zukünftige sommerliche Bedingungen abgebildet sind (Zukunftsszenario). Solange typische Geschosswohnungen als Neubau oder aufgrund von Modernisierungen oder Umnutzungen erstellt werden, kann durch Auswahl zugehöriger Randbedingungen abgeschätzt werden, in welchem Maß Überhitzungen zu

erwarten sind. Dadurch können aufwändige thermische Simulationen vermieden werden, welche üblicherweise notwendig sind, um belastbare Prognosen zum sommerlichen Verhalten zu erstellen. Wichtig ist hierbei, dass wenige Übertemperaturstunden < 259 h/a, was z.B. bei im Mittel 12 Stunden Übertemperaturen pro Sommertag etwa 20 Tagen entspricht, als unkritisch angesehen werden können. Selbst bis 432 h/a sind noch ausreichend wenige Stunden mit Übertemperaturen zu erwarten. Dies kann durchaus auch für eine Optimierung bei Planungen genutzt werden. Geeignete Fensterflächenanteile, Verschattungssysteme und Bauweisen mit höheren Dichten in Kombination mit Nachtlüftung werden wichtiger, da realistisch Zukunftsprognosen deutlich wärmere Randbedingungen ausweisen.

Ausblick Forschungsmethodik

Das vorliegende grundlagenorientierte Forschungsprojekt hat einen Weg aufgezeigt, wie typische Geschosswohnungsbauten und hierzu ähnlich aufgebaute Bürogebäude unter zukünftigen Randbedingungen beurteilt werden können. Entscheidend ist dabei, dass bisher meist nur normativ festgelegte, mittlere äußere Randbedingungen und ebenso normativ festgelegte, innere Randbedingungen ohne realistische Schwankungen verwendet werden. Insbesondere vor dem Hintergrund einer zukünftig stark fluktuierenden Energieerzeugung und den sinnvollen Bestrebungen zu einer Wärmewende stellt sich die Frage, in wieweit die Verwendung zukünftiger Randbedingungen und die Variationen derselben im Gebäudesektor zukünftig zu mehr Planungssicherheit führen kann. Auffallend ist dies beim Standort, der in Energiebedarfsberechnungen keine Rolle spielt, obwohl zukünftig eher direkt in der Region erzeugte Energie zur Verfügung stehen wird. Dies bezieht sich nicht nur auf Neubauten, sondern auch auf den Bestand mit zugehörigen Gebäudesanierungen.

Die gezeigten Untersuchungen liefern eine wichtige Basis, wie statistisch gesicherte Erkenntnisse hierzu gewonnen werden können. Im nächsten Schritt müssen noch weitere Varianten untersucht werden, damit im Sinne einer ausreichenden Deckungsbreite real vorkommender Gebäude argumentiert werden kann. Im Wesentlichen betrifft dies weitere typische Grundrisse im Geschosswohnungsbau, eine weitere Variation der Luftwechselraten (tags, nachts, Stoßlüften), weitere unterschiedliche interne Lasten und Nutzungsprofile, verschiedene Verschattungssituationen (Verschattung durch umliegende Objekte, Nutzung baulicher Verschattungseinrichtungen). Das Ziel soll hierbei sein, mit überschaubarem Aufwand den wichtigsten Teil der tatsächlich vorhandenen Gegebenheiten abzudecken und daraus mittels Sensitivitätsanalysen gezielt eine einfach zu ermittelnde Kenngrößen zu generieren, die für Normungen und Planungen ausreichend sichere Erkenntnisse und Planungsvorgaben liefert.

Nur mittels thermischer Simulationen können sommerliche Überhitzungen sinnvoll vorausberechnet werden. Daher sollen statistisch belegte Erkenntnisse hieraus aufbereitet und in ein einfaches Schema übertragen werden, das Planungsbehörden, PlanerIn oder BauherrIn nutzen können. Wie für den winterlichen Wärmeschutz, bei dem die Kenngröße H_i' die energetische Qualität der Gebäudehülle ausreichend gut abbildet, soll eine Kenngröße mit Bezug auf einen Quadratmeter Nutzfläche entstehen, die den sommerlichen Wärmeschutz ausreichend gut abbildet.

Zur Umsetzung einer solchen Weiterentwicklung kann der vorhandene MatLab-Code unter Nennung der Urheberschaft verwendet und beliebig ergänzt werden. Damit können dann neue Auswahlfelder und Ergebnisfelder ergänzt werden. Die oben beschriebenen zusätzlichen Fragestellungen sollen mittels des gleichen Berechnungsprinzips, das im Rahmen dieses Projektes angewendet wurde, untersucht werden und als statistisch belegte Resultate eingepflegt werden. Daraufhin kann ein weiteres Werkzeug entstehen, welches alle entscheidenden Einflussfaktoren enthält und im günstigsten Fall einen wertvollen Beitrag zur Planung zukünftiger Neubauten und Modernisierungen des Bestandes liefert.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Dr. Roland Göttig (Lst. für Bauphysik, Technische Universität München)

Juan Romero Amaya, M.Sc. (Lst. für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, Technische Universität München)

Mai-Khanh Talke, M.Sc. (Lst. für Bauphysik, Technische Universität München)

Dr. Carole Binsfeld (Lst. für Bauphysik, Technische Universität München)

Nadine Engel, M.Sc. (Lst. für Bauphysik, Technische Universität München)

Prof. Dr. Klaus Sedlbauer (Lst. für Bauphysik, Technische Universität München)

Prof. Thomas Auer (Lst. für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, Technische Universität München)

Projektpartner und weitere Fördermittelgeber

Bundesverband Ziegelindustrie e.V., Reinhardtstr. 12-16, 10117 Berlin

Fachliche Betreuung

Dr.-Ing. Michael Brüggemann

BRÜGGEMANN KISSELER INGENIEURE

i. A. des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

Kurzbiographien



Dr. Roland Göttig

Studium der Physikalischen Technik an der FH München, Studium der Architektur an der TU München und Promotion an der Fakultät für Architektur. Anstellungen am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen in den Abteilungen Hygrothermik und Energiesysteme sowie an der TU München, Lst. für Bauphysik, Freiberufliche Tätigkeit als Planungsingenieur im Bauwesen.



Juan Romero Amaya, M. Sc

Studium der Architektur an der Universidad de los Andes in Bogotá, Kolumbien und Studium KlimaDesign an der TU München. 2018 und 2019 angestellt bei Behnisch Architekten in München, 2021 die Weiterbildung BASEhabitat. Seit 2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen an der TU München.



Mai-Khanh Talke, M.Sc.

Studium Bauingenieurwesen an der TU München und Arbeit als Projektleiterin bei Wolfgang Sorge Ingenieurbüro für Bauphysik in Nürnberg bis 2016. Bis 2018 Forschung an der Hochschule Augsburg an der bauphysikalischen Optimierung von emersen Outdoor-Photobioreaktoren an Gebäudefassaden. Seit 2016 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Bauphysik der TU München.



Dr. Carole Binsfeld

Studium des Umweltingenieurwesens und des Bauingenieurwesens an der TU München. Von 2019 bis 2023 wissenschaftliche Mitarbeiterin und seit 2024 Lehrbeauftragte am Lehrstuhl für Bauphysik an der TU München mit dem Schwerpunkt Raumklima und Behaglichkeit. 2023 Promotion an der TU München.



Nadine Engel, M.Sc.

Studium der Architektur und des Bauingenieurwesens an der Universität Siegen und Studium Ressourcenschonendes und Nachhaltiges Bauen an der TU München. Seit 2023 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lst. für Bauphysik der TU München mit dem Schwerpunkt Produktentwicklungsstrategie und Ökobilanzierung.



Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer

Thomas Auer ist Professor für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen an der TU München (Lehrstuhlinhaber) und in der Geschäftsleitung von Transsolar. Lehraufträge und Gastprofessuren u.a. Yale University, Ryerson University.c. Forschungsschwerpunkt Dekarbonisierung des Gebäudesektors, Robustheit durch „low-tech“ und Aufenthaltsqualität im Innen- und Außenraum.

**Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Klaus Sedlbauer**

Klaus Sedlbauer ist Professor für Bauphysik an der TU München (Lehrstuhlinhaber). Zuvor Professor für Bauphysik (Lehrstuhlinhaber) an der Universität Stuttgart. Von 2003 bis 2022 Leitung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik und Professor Konstruktive Bauphysik und Gebäudetechnik an der Fachhochschule Rosenheim. 2001 Promotion an der Universität Stuttgart.

Verzeichnisse

Literaturverzeichnis

Albert, A., Bergner, H., & Berner, K. (2018). *Bautabellen für Ingenieure: mit Berechnungshinweisen und Beispielen* (Vol. 23. Auflage). Bundesanzeiger Verlag GmbH.

Auer, T., Hamacher, T., Wagner, U., Atabay, D., de-Borja-Torrejón, M., Dornmair, R. et al. (2017): *Gebäude als intelligenter Baustein im Energiesystem. Lastmanagement-Potenziale von Gebäuden im Kontext der zukünftigen Energieversorgungsstruktur in Deutschland.*

Bay BO Art. 45 abs. 2: Bayerische Bauordnung. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayBO-45>, zuletzt geprüft am 01.09.2023.

Braune, A., Ekhvaia, L., & Quante, K. (2022). „*Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion: Ergebnisse einer Studie mit 50 Gebäuden*“, DGNB eV, Aug. 2021. Verfügbar unter: <https://www.dgnb.de/de/verein/publikationen/index.php>. Zugriff am, 26.3.2024.

Bundesbaupolitik (2022): *Mehr bezahlbare und klimagerechte Wohnungen schaffen.* Bundesbaupolitik. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/bregde/suche/wohnungsbau-bundesregierung-2006224>, zuletzt geprüft am 01.09.2023.

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (2023) *ÖKOBAUDAT – Informationsportal Nachhaltiges Bauen.* www.oekobaudat.de, abgerufen am 15.12.2023

Cohen, J. (1992). *Quantitative methods in psychology: A power primer.* Psychol. Bull., 112, p. 1155-1159.

DGNB (2018): *DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau. Version 2018.* Hg. v. DGNB. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen. Online verfügbar unter <https://www.dgnb.de/de/zertifizierung/das-wichtigste-zur-dgnb-zertifizierung/nutzungsprofile>.

DIN 4108-2:2013-02: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.* Berlin: Beuth Verlag GmbH (Deutsche Norm).

DIN 4108-3:2018-10.(2018). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.* Berlin: Beuth Verlag GmbH (Deutsche Norm).

DIN 5034-1, *Tageslicht in Innenräumen. Teil 1, Begriffe und Mindestanforderungen.* Berlin: Beuth Verlag GmbH (Deutsche Norm).

DIN EN 17037, *Tageslicht in Gebäuden. Deutsche Fassung EN 17037:2018.* Berlin: Beuth Verlag GmbH (Deutsche Norm).

DIN EN ISO 7730:2006-05: *Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit.* Berlin: Beuth Verlag GmbH (Deutsche Norm).

DIN V 18599-10:2018-09: *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten.* Berlin: Beuth Verlag GmbH (Deutsche Norm).

- Doleski, O. D. (2020): Praxis der digitalen Energiewirtschaft von den Grundlagen bis zur Verteilung im Smart Grid. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg (Realisierung Utility 4.0 / Oliver D. Doleski, Hrsg, Band 1).
- DWD (2020): Klimaberatungsmodul. Hg. v. DWD. Online verfügbar unter <https://kunden.dwd.de/obt/index.jsp>, zuletzt geprüft am 15.09.2022.
- DWD (2021): Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2020. DWD. Offenbach. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb_2020.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 15.09.2022.
- Deutscher Wetterdienst (2023): Wetter- und Klimalexikon. Hg. v. DWD. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html>, zuletzt geprüft am 17.04.2023.
- Frank, W. (1975): Raumklima und thermische Behaglichkeit. Literaturoberprüfung ; mit 21 Bildern und 12 Tabellen. Berlin: Ernst (Berichte aus der Bauforschung, 104).
- Freis, J., Vohlidka, P. & Günthner, W. (2016): Low-Carbon Warehousing: Examining Impacts of Building and Intra-Logistics Design Options on Energy Demand and the CO2 Emissions of Logistics Centers. In: Sustainability 8 (5), S. 448. DOI: 10.3390/su8050448.
- Friedrich, K. & Kaspar, F. (2019): Rückblick auf das Jahr 2018. das bisher wärmste Jahr in Deutschland. Hg. v. Deutsche Wetter Dienst.
- Gertis, K. (1984): Bauphysikalische Grundlagen der Wohnungslüftung. In: DBZ 2/84, S. 231–234.
- Gierga, M. & Staniszewski, A. (2016). BAULICHER SCHALLSCHUTZ NACH DIN 4109.
- Glossary of Meteorology (2019). "Urban Heat Island". American Meteorological Society. Retrieved 2019-04-12.).
- Götz, M., Lefebvre, J., Mörs, F., McDaniel Koch, A., Graf, F., Bajohr, S. et al. (2016): Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. In: Renewable Energy 85, S. 1371–1390. DOI: 10.1016/j.renene.2015.07.066.
- Günther, D., Wapler, J., Langner, R., Helmling, S., Miara, M., Fischer, D. et al. (2020): WPsmart im Bestand. Felduntersuchung optimal abgestimmter Wärmepumpenheizungssysteme in Bestandsgebäuden beim Betrieb im konventionellen sowie im intelligenten Stromnetz (Smart Grid). Abschlussbericht. Fraunhofer ISE.
- Hauser, G.; Otto, F.: Niedrigenergiehäuser – bauphysikalische Entwurfsgrundlagen. Informationsdienst Holz. Holzbau Handbuch, Reihe 1 Entwurf und Konstruktion. Düsseldorf, Deutschland, 1992.
- Hausladen, G., Auer, T., Schneegans, J., Klimke, K., Riemer, H., Trojer, B. et al. (2014): Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme - Speicher- und Lastmanagementpotenziale in Gebäuden. Endbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 2920).
- Hilgers, R.-D., Heussen, N., Stanzel, S. (2019). Korrelationskoeffizient nach Spearman. In A. M. Gressner & T. Arndt (Hrsg.): Lexikon der Medizinischen Laboratoriumsdiagnostik. Berlin: Springer Verlag.
- Holm, A., Sprengard, C., Schmidt, W. & Maderspacher, C. (2021): Gesamtenergetische Nachhaltigkeitsbewertung von POROTON-Mehrfamilienhäusern im Niedrigstenergiegebäudestandard. FIW München (Forschungsbericht FO-2020/04).

IPCC (2014): Climate change 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von R. K. Pachauri, M. R. Allen, V. R. Barros, J. Broome, W. Cramer, R. Christ et al. Geneva, Switzerland.

IPCC (2022): Climate change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von Hans-Otto Pörtner, Debra C. Roberts, Melinda M. B. Tignor, Elvira Poloczanska, Katja Mintenbeck, Andrés Alegría et al. Hg. v. Hans-Otto Pörtner. Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Klauß, S. & Maas, A. (2010): Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit (Forschungsinitiative ZukunftBau, SF – 10.08.17.7-09.27).

Kolmetz, S. (1996): Coverbild für Thermische Bewertung von Gebäuden unter sommerlichen Randbedingungen ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung von Raumtemperaturen in Gebäuden im Sommer und deren Häufigkeit Thermische Bewertung von Gebäuden unter sommerlichen Randbedingungen ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung von Raumtemperaturen in Gebäuden im Sommer und deren Häufigkeit. Dissertation.

Kornadt, O., Carrigan, S., Schöndube, T., Winter, S., Mindrup, K. & Knieriemen, G. (2019): Dynamisch thermisch-hygrisches Verhalten von Massivbaukonstruktionen: Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für Gebäude aus Mauerwerk und thermisch aktivierbare Massivholzelemente. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 3129).

Krähenmann, S. (2017): Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Handbuch. DWD, BBR.

Krause, H., Aimer, D., Wirnsberger, M., Heiler, S. & Park, S. (2021): Untersuchung kostengünstiger Lüftungslösungen für den mehrgeschossigen Wohnungsbau hinsichtlich Energieeffizienz, Lüftungseffektivität und Nutzerkomfort in gekoppelten Labor- und Simulationsumgebungen. Bonn: BBSR-Online-Publikation (Forschungsinitiative Zukunft Bau).

Kronthaler, F. (2021). Statistik angewandt mit Excel: Datenanalyse ist (k)eine Kunst. Berlin: Springer Verlag.

Kummer, N. (2017). Basics Mauerwerksbau. Birkhäuser. <https://doi.org/doi:10.1515/9783035612516>

Lücking, R.-M., Hauser, G. (2011) Die thermische Konditionierung von Gebäuden im Kontext eines zukünftigen Energieversorgungssystems. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

Eglitis, L. (2021): Das Klima in Frankreich. Online verfügbar unter <https://www.laenderdaten.info/Europa/Frankreich/Klima.php>, zuletzt geprüft am 15.09.2022.

Lüking, R.-M. & Hauser, G. (2011): Die thermische Konditionierung von Gebäuden im Kontext eines zukünftigen Energieversorgungssystems. Studie des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl.

Maas, S., Scholzen, F., Thewes, A., Waldmann, D. & Zürbes, A. (2011): Feldstudie zum Energieverbrauch von Bürogebäuden. In: Bauphysik 33 (3), S. 158–166. DOI: 10.1002/bapi.201110019.

Maier, J. (2012). Baustoffe. In J. Maier (Ed.), Handbuch Historisches Mauerwerk: Untersuchungsmethoden und Instandsetzungsverfahren (pp. 67-100). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25468-0_3

Müller, N. & Pfnür, A. (2016): Wirtschaftlichkeitsberechnungen bei verschärften energetischen Standards für Wohnungsneubauten aus den Perspektiven von Eigentümern und Mietern. Methodisches Vorgehen und Fallbeispiel. In: Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Bd. 32. Unter Mitarbeit von Andreas Pfnür.

Nietsch, J., Pregger, T., Naegler, T., Heide, D., de Tena, D. L., Trieb, F., Scholz, Y., Nienhaus, K., Gerhardt, N., Sterner, M., Trost, T., von Oehsen, A., Schwinn, R., Pape, C., Hahn, H., Wickert, M. und Wenzel, B. (2012) Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. BMU Schlussbericht, Stuttgart.

Nagler, F. et.al. (2019) Einfach Bauen. Ganzheitliche Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen - Untersuchung der Wechselwirkung von Raum, Technik, Material und Konstruktion. Forschungsinitiative Zukunft Bau, Band F 3151, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart. ISBN 978-3-7388-0367-9

Ochsner: Technischen Daten_ WP, zuletzt geprüft am 01.09.2023.

Offermann, M., von Manteuffel, B. & Hermelink, A. (2013): Begleituntersuchung zur europäischen Berichterstattung „Cost-Optimal-Level“ – Modellrechnungen. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). BMVBS.

Ottel, R. (1974): Zusammenhang zwischen Raumklima und Gebäudekonstruktion von Schulen. In: DBZ 22 (4), S. 723–744.

Prinzing, M., Berthold, M., Bertsch, S. & Eschmann, M. (2021): Feldmessungen von Wärmepumpen-Anlagen. Heizsaison 2020/21. EnergieSchweiz.

Sassine, E., Cherif, Y., Dgheim, J., & Antczak, E. (2020). Investigation of the mechanical and thermal performances of concrete hollow blocks. SN Applied Sciences, 2(12), 2006. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03881-x>

Schlitzberger, S., Kempkes, C., Maas, A. & Schäfers, M. (2017): Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf Heizwärmebedarf und thermischen Komfort. In: Bauphysik 39 (1), S. 57–63. DOI: 10.1002/bapi.201710008.

Schöndube, T., Carrigan, S., Kornadt, O. & Schoch, T. (2018): Niedrigstenergiegebäude - Entwicklung eines Standards und einer Berechnungsmethode für die Gebäudeenergieeffizienz. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 3056).

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2021): Datenreport 2021. Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland.

Transsolar Software Engineering (2017) TRNSYS, Add-Ons, TRNLizard – Add-On für Rhinoceros/Grasshopper https://trnsys.de/static/d5760da45b4c0b4585b20a4b29e6bdb9/170307_T18_flyer_TS_TRNLizard_de.pdf, abgerufen am 3.4.2023)

Umweltbundesamt (2021): Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/emissionen>, zuletzt geprüft am 01.09.2023.

Vering, C., Maier, L. & Breuer, K. (2021): Comparison of annual performance factors of normatively designed heat pump systems. In: Bauphysik 43 (2), S. 125–132. DOI: 10.1002/bapi.202100001.

Walberg, D., Brosius, O., Schulze, T. & Cramer, A. (2015): Massiv- und Holzbau bei Wohngebäuden. Vergleich von massiven Bauweisen mit Holzfertigbauten aus kostenseitiger, bautechnischer und nachhaltiger Sicht. Kiel: ARGE//eV Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V (Bauforschungsbericht, Nr. 68).

Willems, W. M., Schild, K. & Stricker, D. (2018). Feuchteschutz. Springer Vieweg Wiesbaden. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-658-05685-8>

Willems, W. M., Schild, K. & Stricker, D. (2019). Berechnungshilfen. In W. M. Willems, K. Schild, & D. Stricker (Eds.), Formeln und Tabellen Bauphysik: Wärmeschutz – Feuchteschutz – Klima – Akustik – Brandschutz (pp. 1-42). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-23946-6_1

Wörner, P., Müller, A. & Sauerwein, D. (2019): Dynamische CO₂ -Emissionsfaktoren für den deutschen Strom-Mix. In: Bauphysik 41 (1), S. 17–29. DOI: 10.1002/bapi.201800034.

WUFI- Datenbank. (2006). Holzkirchen. Fraunhofer Institut für Bauphysik

Zhou, X., Carmeliet, J. & Derome, D. (2018). Influence of envelope properties on interior insulation solutions for masonry walls. *Building and Environment*, 135, 246-256. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.047>

Zirkelbach, D. (2001). Austrocknungsverhalten hochdämmender Mauersteine Technische Universität München].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abweichungen der 10-Jahresperioden 1881 – 1890 bis 2011 – 2020 von dem vieljährigen Temperaturmittel 1881 – 1910 (DWD, 2021).....	11
Abbildung 2: Sommer- und Hitzetage in Deutschland 1951 bis 2020 (DWD, 2021).....	12
Abbildung 3: Klimakarte zur Zuordnung der Sommer-Klimaregion (DIN 4108-2:2013-02).....	13
Abbildung 4: Klimaregion A (Rostock) - Vorort: 54,1817° N 12,0824° O / Innenstadt: 54,0878° N 12,1412° O...	14
Abbildung 5: Klimaregion B (Potsdam) - Vorort: 52,3845° N 13,0645° O / Innenstadt: 52,4031° N 13,0658° O..	14
Abbildung 6: Klimaregion C (Mannheim) - Vorort: 49,5100° N 8,5489° O / Innenstadt: 49,4902° N 8,4637° O..	15
Abbildung 7: TRY-15 und TRY-45 Temperaturen Rostock.....	15
Abbildung 8: TRY-15 und TRY-45 Temperaturen Potsdam.....	16
Abbildung 9: TRY-15 und TRY-45 Temperaturen Mannheim.....	16
Abbildung 10: TRY-15 Mittelsommertemperaturen.....	17
Abbildung 11: TRY-45 Mittelsommertemperaturen.....	17
Abbildung 12: Vergleich der Mittelsommertemperaturen im Vorort (VO) und in der Innenstadt (IS) der drei Standorte.....	18
Abbildung 13: Vergleich der Sommertage im Vorort (VO) und in der Innenstadt (IS) der drei Standorte.....	19
Abbildung 14: Vergleich der Hitzetage im Vorort (VO) und in der Innenstadt (IS) der drei Standorte.....	19
Abbildung 15: Vergleich der Tropennächte im Vorort (VO) und in der Innenstadt (IS) der drei Standorte.....	20
Abbildung 16: Standorte der Messstationen.....	20
Abbildung 17: Gemessene Temperaturen und Kenntage in Rostock von 2016 bis 2021.....	21
Abbildung 18: Gemessene Temperaturen und Kenntage in Potsdam von 2016 bis 2021.....	21
Abbildung 19: Gemessene Temperaturen und Kenntage in Mannheim von 2016 bis 2021.....	21
Abbildung 20: Vergleich der Mitteltemperaturen der drei Standorte.....	22
Abbildung 21: Vergleich der Kenntage der drei Standorte.....	23
Abbildung 22: MFH mit Raumzonen aus Walberg et al. (2015).....	24
Abbildung 23: MFH klein aus (Klauß und Maas 2010).....	25
Abbildung 24: Grundriss des angepassten Modellgebäudes (eigene Darstellung nach Schlitzberger et al. (2017).....	25
Abbildung 25: Beschreibung der Anwendbarkeit der Kategorien zur Auslegung des Raumklimas (DIN EN 15251).....	30
Abbildung 26: Empfohlene operative Innenraumtemperatur [°C] in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außenlufttemperatur [°C] entsprechend der Vorgaben der DIN EN 15251.....	30
Abbildung 27: Auslegungswerte für operative Innentemperatur von Gebäuden ohne maschinelle Kühlanlage DIN EN 15251.....	31
Abbildung 28: Anzahl der Wohnungen nach Gebäudetyp im Jahr 2018. Eigene Darstellung nach (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2021).....	36
Abbildung 29: Initiale Variantenmatrix.....	37

Abbildung 30: Erläuterungen zum grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil f' . Bei einer Veränderung der Raumhöhe bleibt f' konstant, wenn die Fensterhöhe nicht verändert wird im Gegensatz zum üblichen fassadenflächenbezogenen Wert f	37
Abbildung 31: Basisvarianten für den ersten Durchlauf der Simulationsreihe.....	38
Abbildung 32: Finale Variantenmatrix nach Ausschluss von Parametern (rot), die keine wesentlichen weiteren Erkenntnisse liefern.....	39
Abbildung 33: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit vom grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil f'	42
Abbildung 34: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit vom Gesamtenergiedurchlassgrad der Fenster	43
Abbildung 35: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit von der Verglasung	43
Abbildung 36: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit vom Sonnenschutz.....	44
Abbildung 37: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit von der Raumhöhe.....	44
Abbildung 38: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit von den Außenwänden AW0 bis AW3.....	45
Abbildung 39: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit von der Innendecke.....	45
Abbildung 40: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit von der Belegung.....	46
Abbildung 41: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit von der Orientierung	46
Abbildung 42: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit von den zugrundeliegenden Wetterdaten.....	47
Abbildung 43: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit vom Eck- und Reihenzimmer (EZ bzw. RZ)	47
Abbildung 44: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit vom betrachteten Standort (A = Rostock, B = Potsdam, C = Mannheim).....	48
Abbildung 45: Korrelationsmatrix der Einflüsse des winterlichen Wärmeschutzes (Darstellung 1).....	50
Abbildung 46: Korrelationsmatrix der Einflüsse des winterlichen Wärmeschutzes (Darstellung 2).....	51
Abbildung 47: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit vom grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil f'	53
Abbildung 48: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit vom Gesamtenergiedurchlassgrad der Fenster	53
Abbildung 49: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit von der Verglasung	54
Abbildung 50: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit vom Sonnenschutz.....	54
Abbildung 51: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit von der Raumhöhe.....	55
Abbildung 52: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit von den Außenwänden AW0 bis AW3.....	55
Abbildung 53: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit von der Innendecke.....	56
Abbildung 54: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit von der Belegung.....	56
Abbildung 55: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit von der Gebäudeorientierung.....	57
Abbildung 56: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit von den zugrundeliegenden Wetterdaten	57
Abbildung 57: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit vom Eck- und Reihenzimmer (EZ bzw. RZ)	58
Abbildung 58: Übertemperaturstunden in Abhängigkeit vom betrachteten Standort (A = Rostock, B = Potsdam, C = Mannheim).....	58
Abbildung 59: Korrelationsmatrix der Einflüsse des sommerlichen Wärmeschutzes (Darstellung 1).....	60
Abbildung 60: Korrelationsmatrix der Einflüsse des sommerlichen Wärmeschutzes (Darstellung 2).....	61

Abbildung 61: Korrelationskoeffizienten der Parameter auf die Zielgröße der Übertemperaturstunden – Berücksichtigung leichter und massiver Bauweisen	62
Abbildung 62: Korrelationskoeffizienten der Parameter auf die Zielgröße der Übertemperaturstunden – Berücksichtigung massiver Bauweisen	62
Abbildung 63: Eckzimmer – Gegenwart – Stahlbetondecke	64
Abbildung 64: Eckzimmer – Zukunft – Stahlbetondecke.....	65
Abbildung 65: Fensterflächenanteil f' 14 % und f' 30 % mit Tageslichtquotienten von $>2,2$ % für mehr als 50 % der Grundfläche und Tageslichtquotient 0,9 % für mehr als 95 % der Grundfläche (DF = Daylight Factor = Tageslichtquotient).....	66
Abbildung 66: Entwicklung der Kraftwerksleistung in Deutschland (Nietsch, et.al., 2012).....	68
Abbildung 67: Druckfestigkeit mineralischer Baustoffe für Außenwände am Beispiel von Ziegelwandkonstruktionen in Abhängigkeit der Rohdichte (Albert, Bergner & Berner, 2018).....	69
Abbildung 68: Sensitivitätsindex für Variationen von +/- 10 % der mittleren Rohdichte (1200 kg/m^3) für Wärmeleitfähigkeit, Druckfestigkeit, Wasseraufnahmekoeffizient und gewichtetes Schalldämm-Maß.....	70
Abbildung 69: Ökobilanzen der untersuchten Fassadenkonstruktionen, CO ₂ -Äquivalente (Phase A bis C).....	72
Abbildung 70: Darstellung des Aufbaus und der Ergebnispräsentation im Demonstrator.....	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Sommer-Klimaregionen.....	14
Tabelle 2: Randbedingungen für thermische Simulation des Mehrfamilienhauses	26
Tabelle 3: Tagesprofile für interne Lasten nach Szenario „Normal“ und „Homeoffice“	27
Tabelle 4: Tagesprofile für Fensterlüftung bzw. Luftwechsel in Abhängigkeit der Raum- und Belegungssituation	28
Tabelle 5: Bezugswerte und Anforderungswerte für den sommerlichen Wärmeschutz (DIN 4108-2).....	29
Tabelle 6: Außenwandaufbauten (von außen nach innen).....	34
Tabelle 7: Innenwandaufbauten.....	35
Tabelle 8: Innendeckenaufbauten (von oben nach unten).....	35
Tabelle 9: Referenzfall (Eckzimmer mit einem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil f' von 18 %).....	41
Tabelle 10: Definition des Signifikanzniveaus.....	51
Tabelle 11: Rohdichteabhängige Parameter als Mittelwerte nach Baualterklassen sortiert.....	70

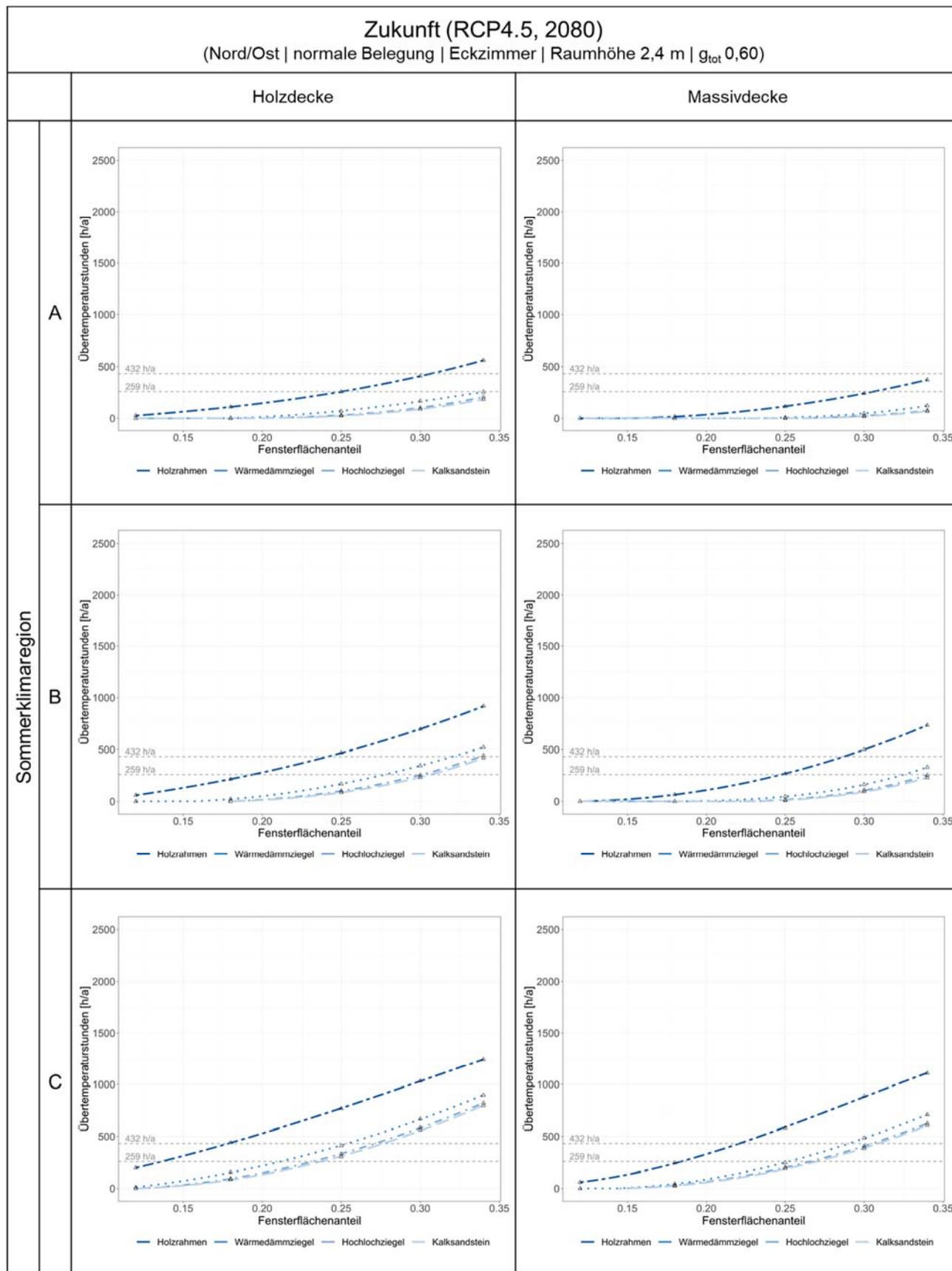
Anlagen

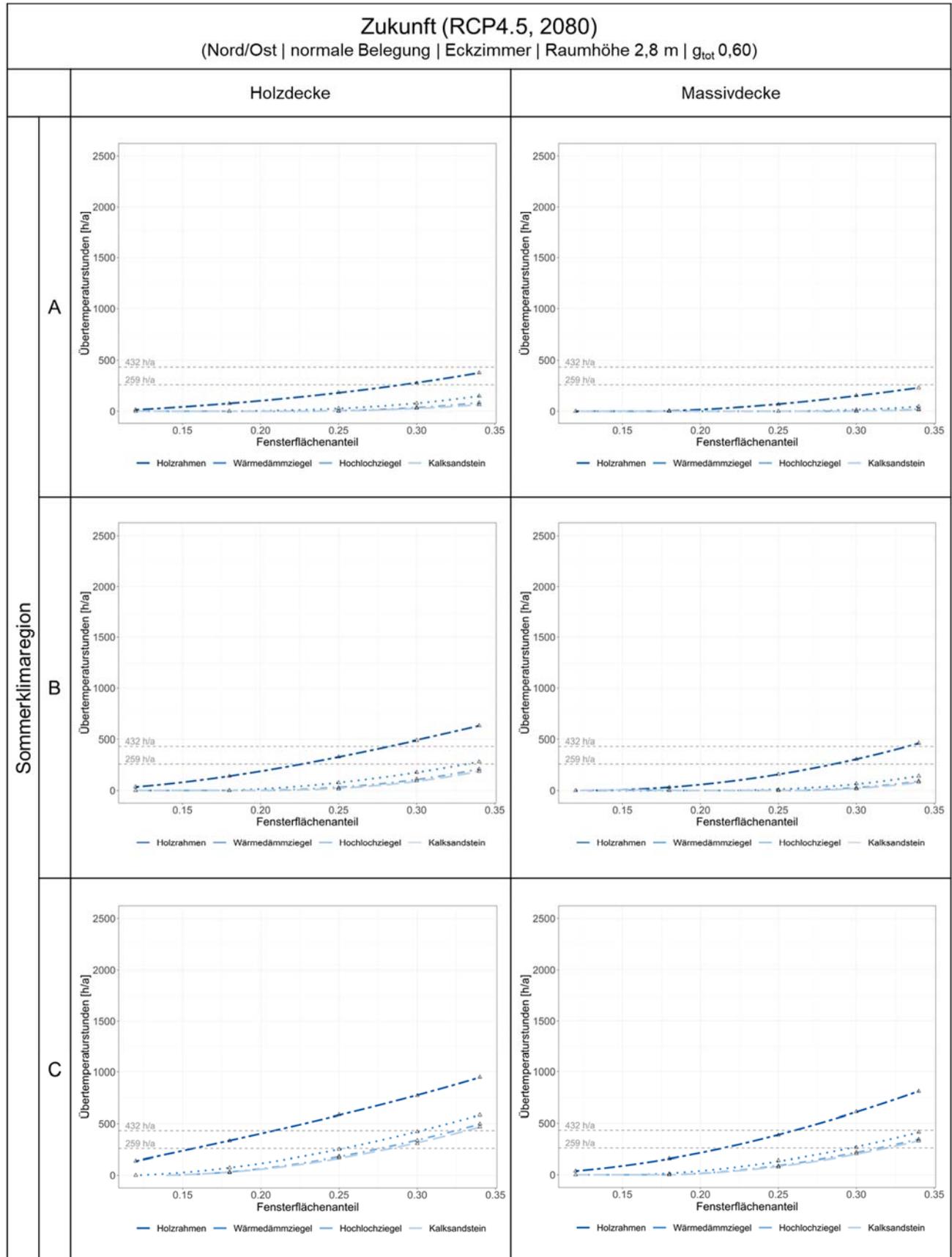
- Anhang A - Liniendiagramme mit Gesamtenergiedurchlassgrad = 0,60
- Anhang B - Liniendiagramme mit Gesamtenergiedurchlassgrad = 0,33
- Anhang C - Liniendiagramme mit Gesamtenergiedurchlassgrad = 0,18

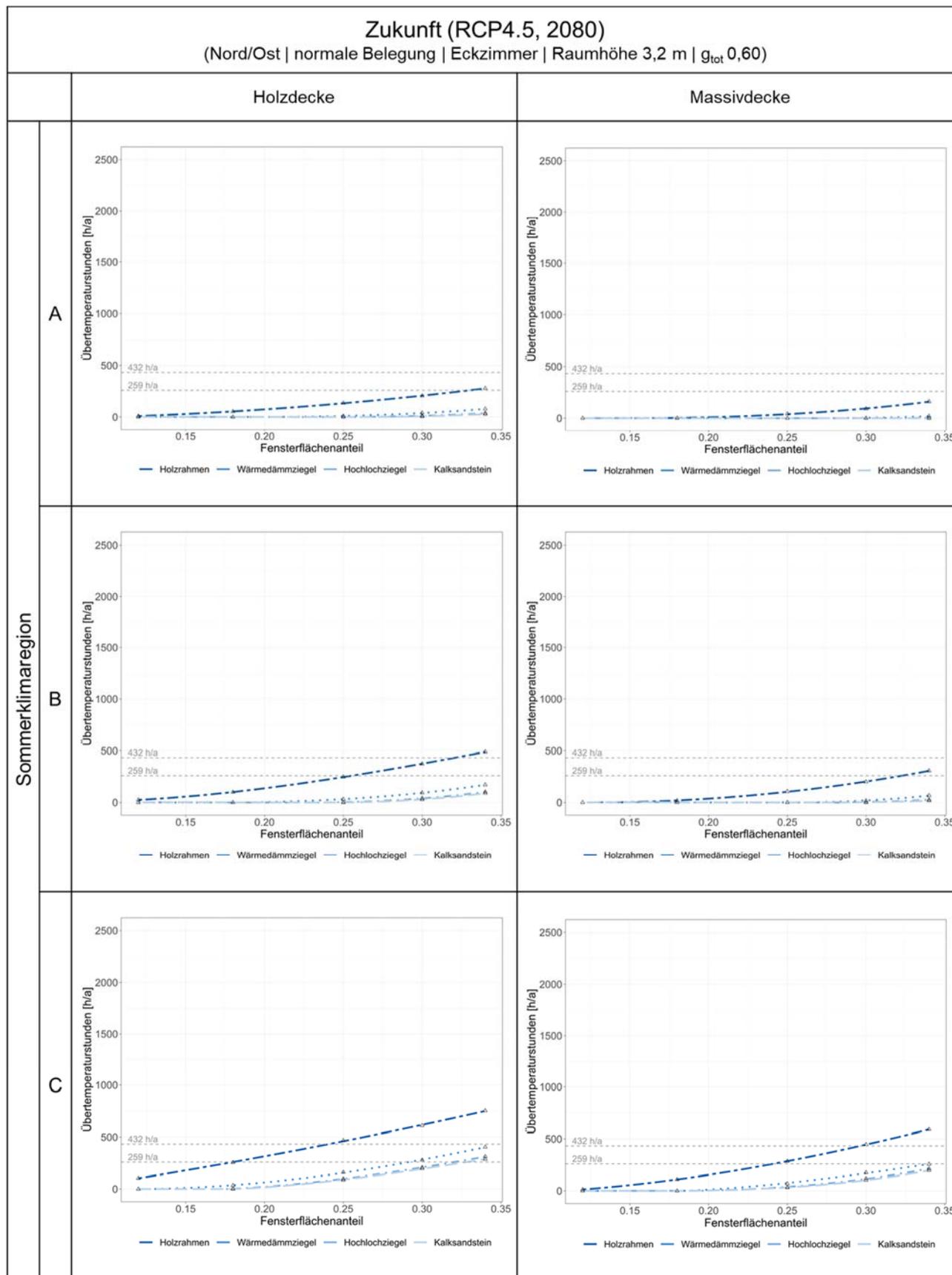
Endbericht für das Forschungsvorhaben:

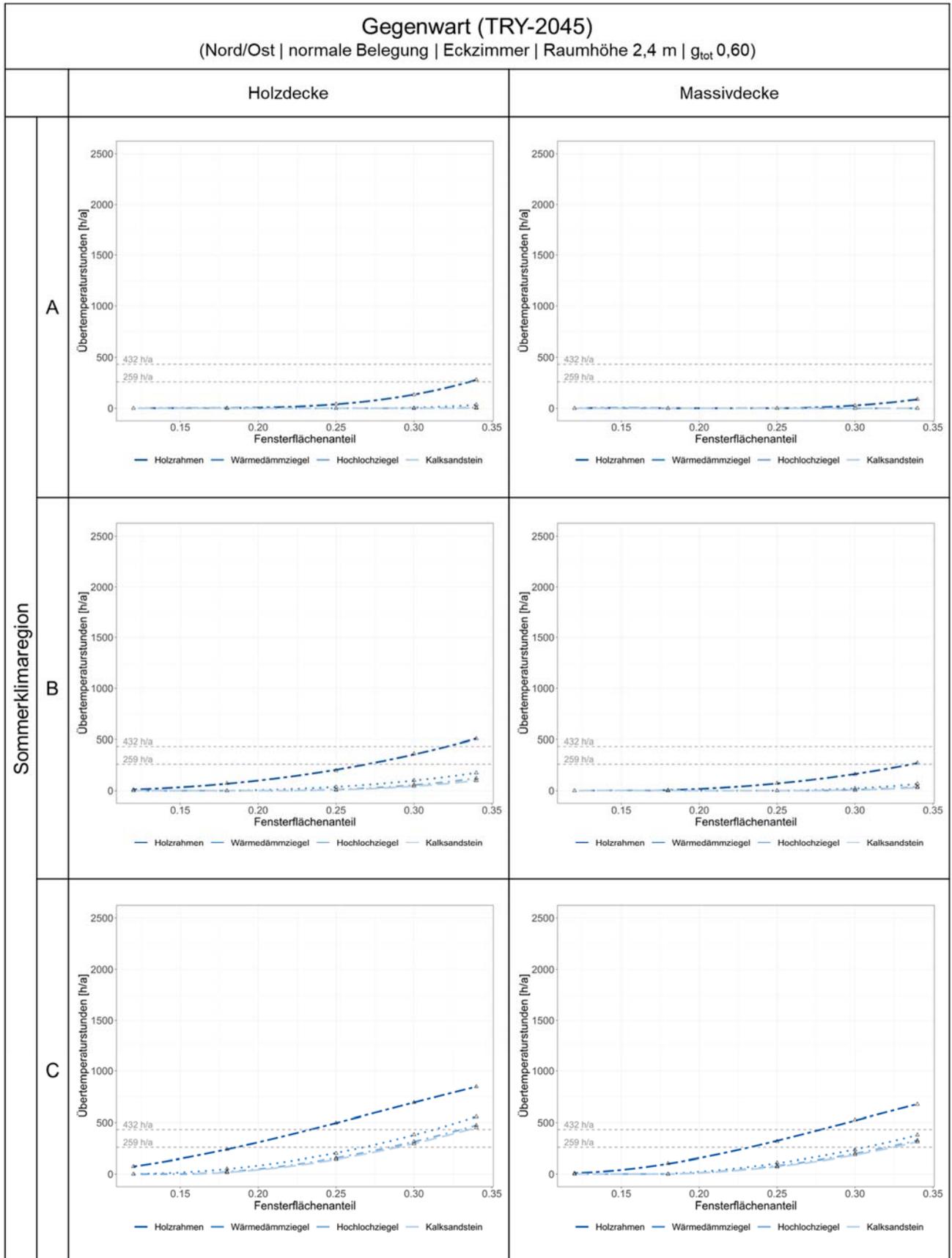
Zukunft von Bauweisen mit höheren Dichten

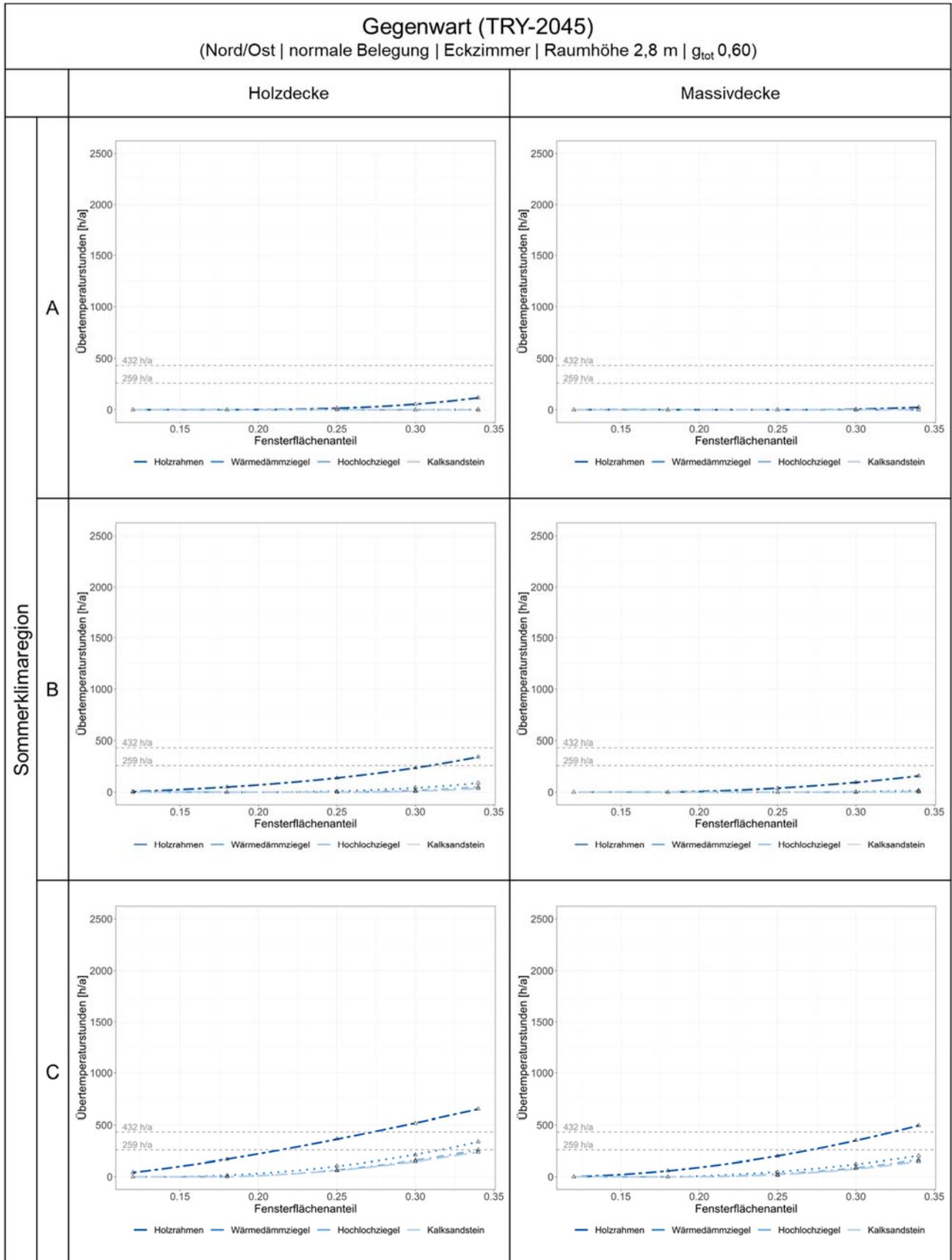
Anhang A

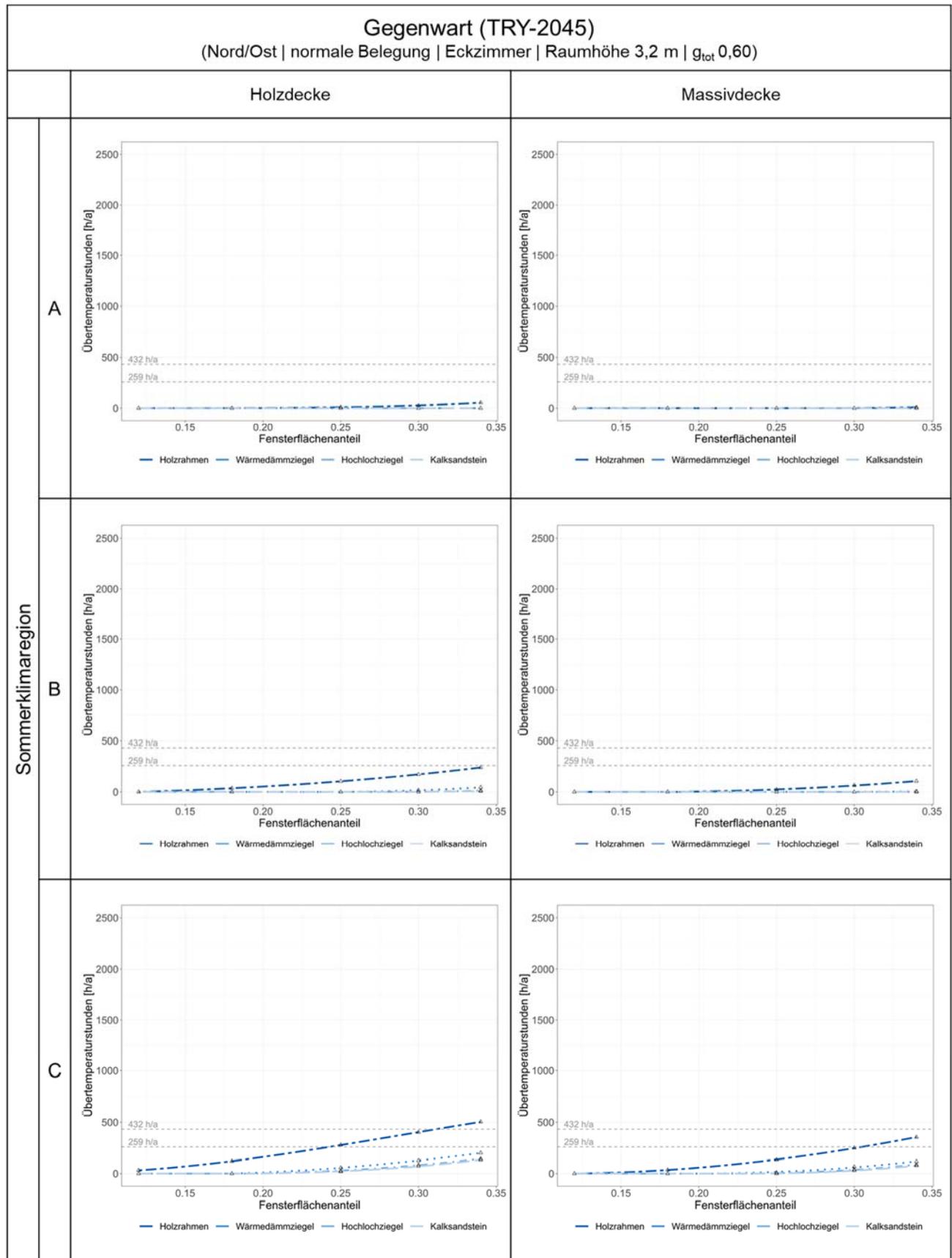


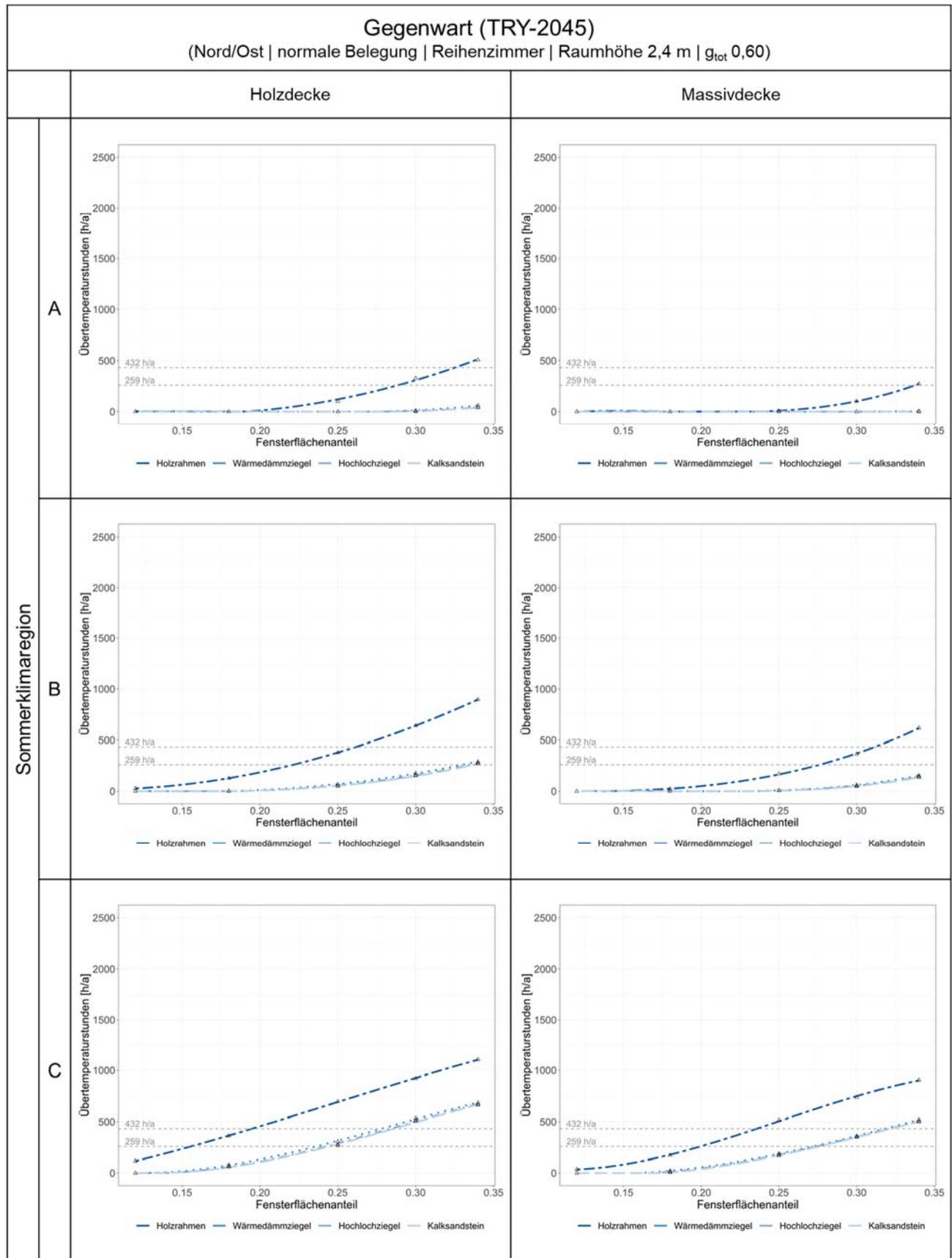


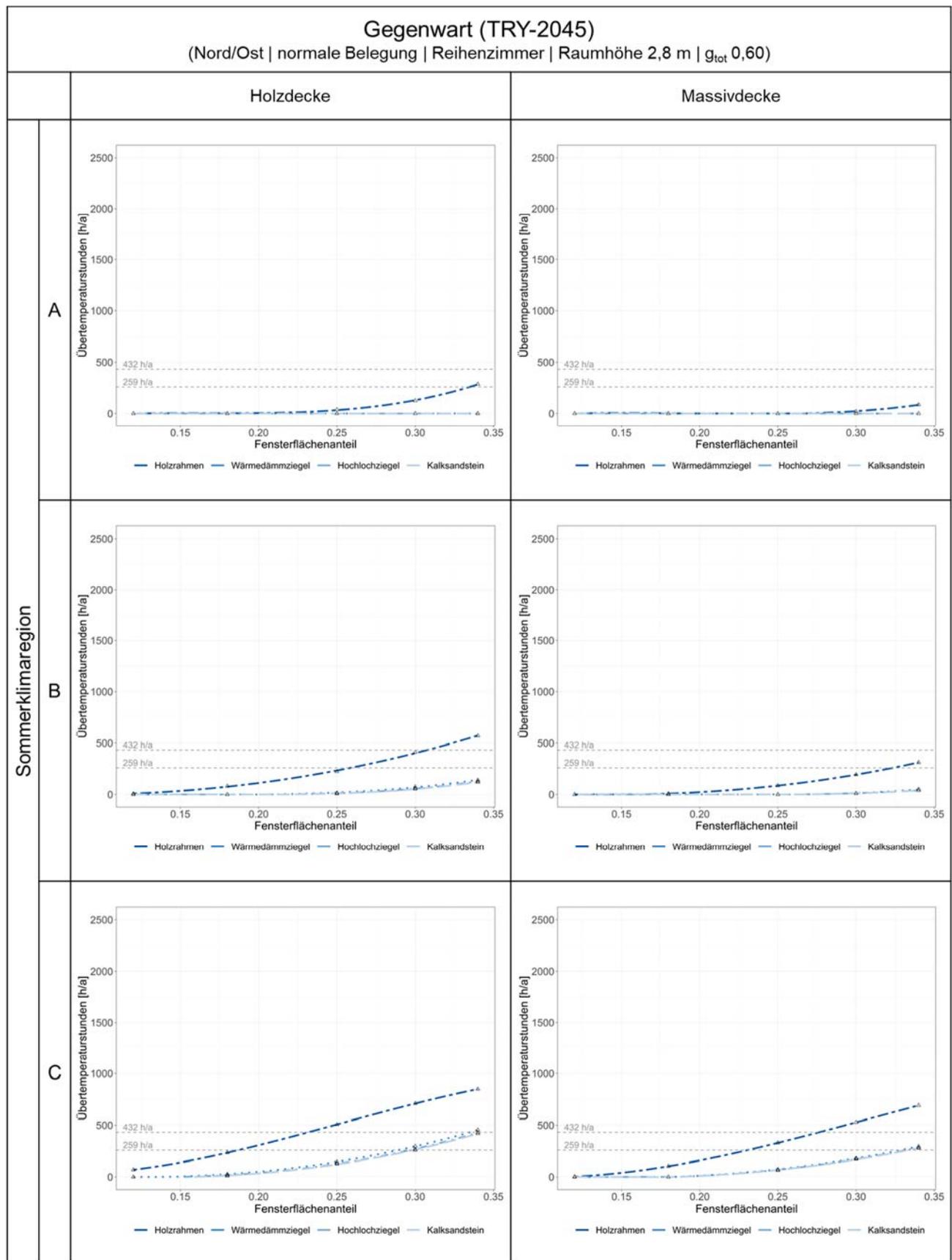


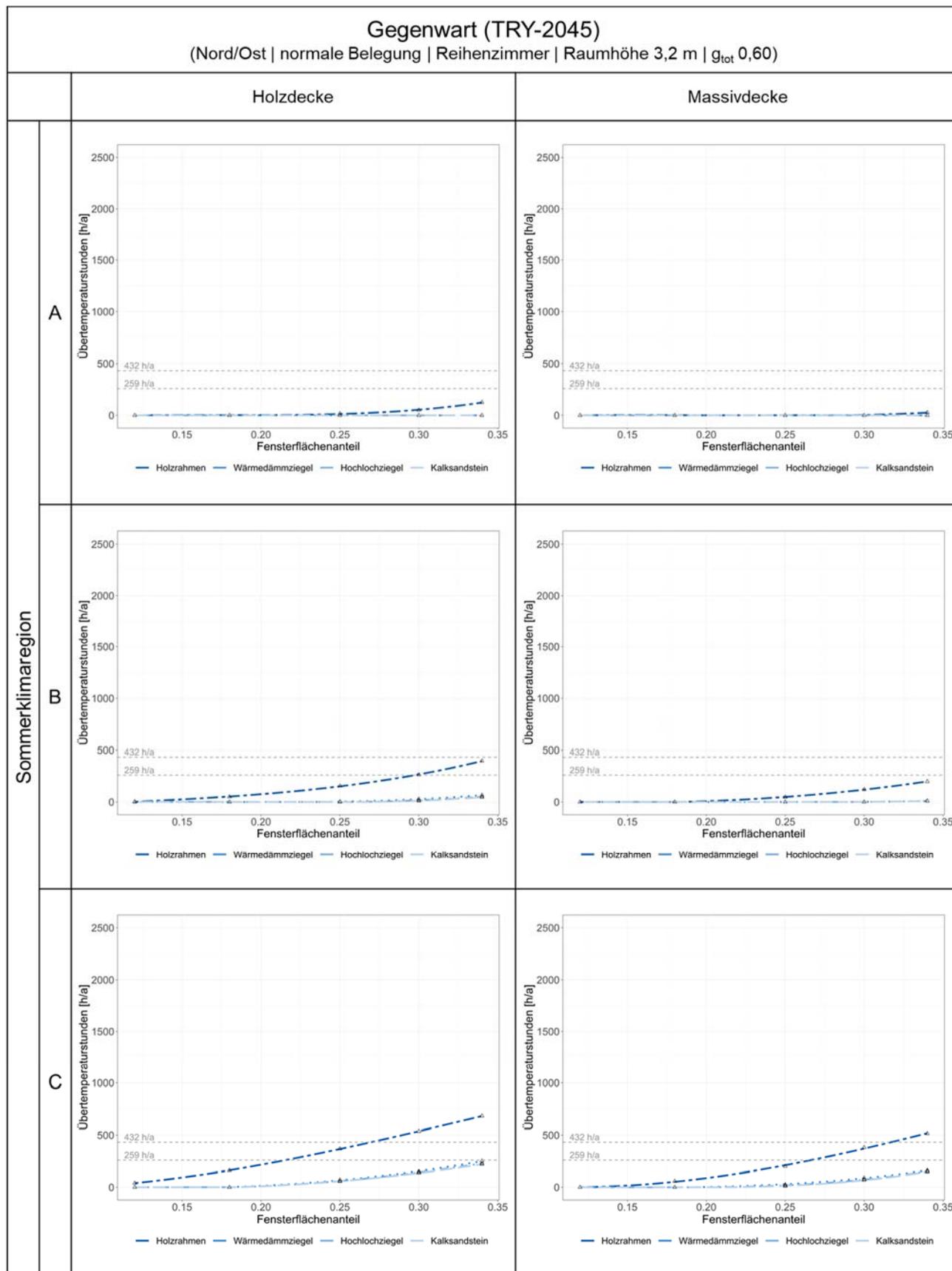


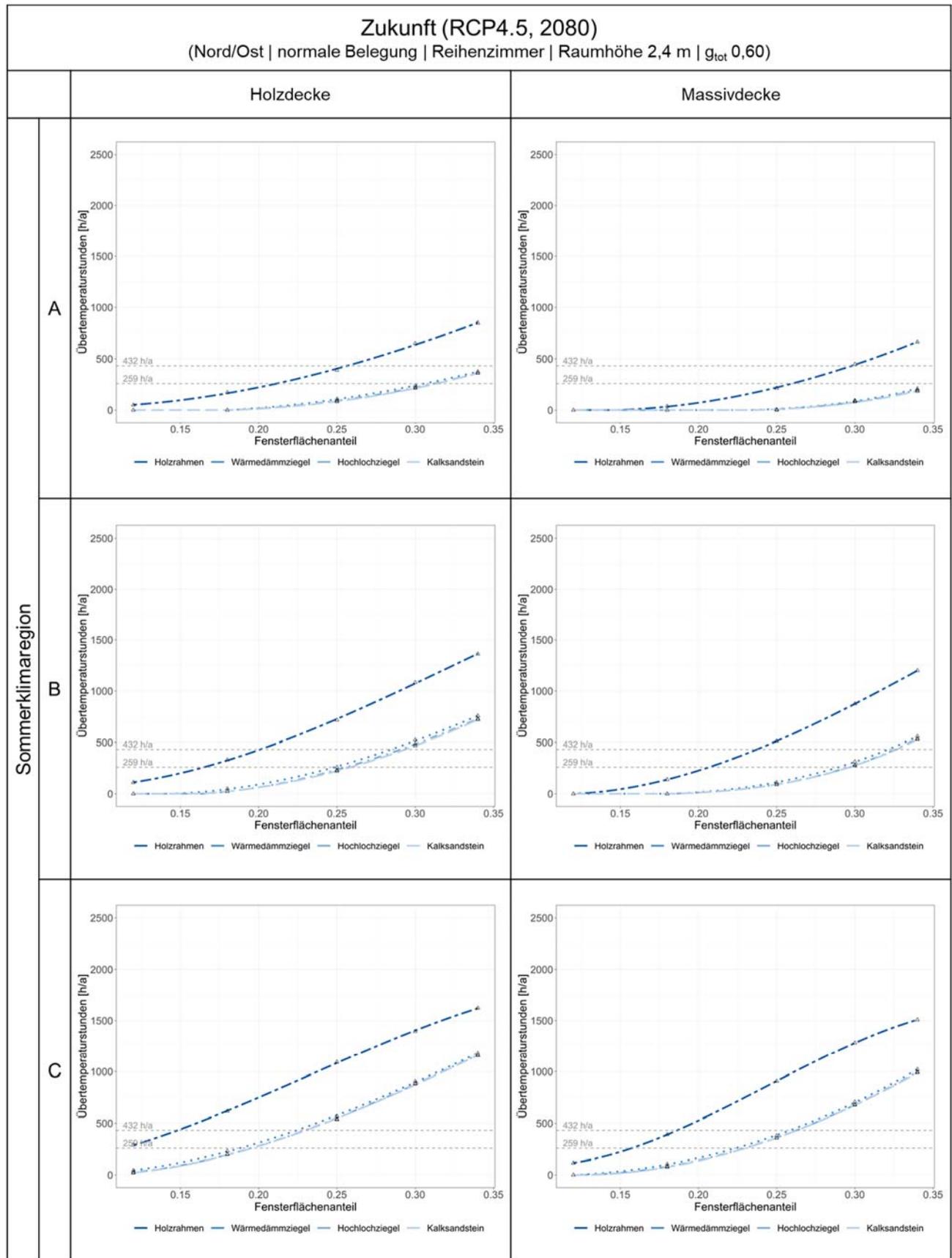


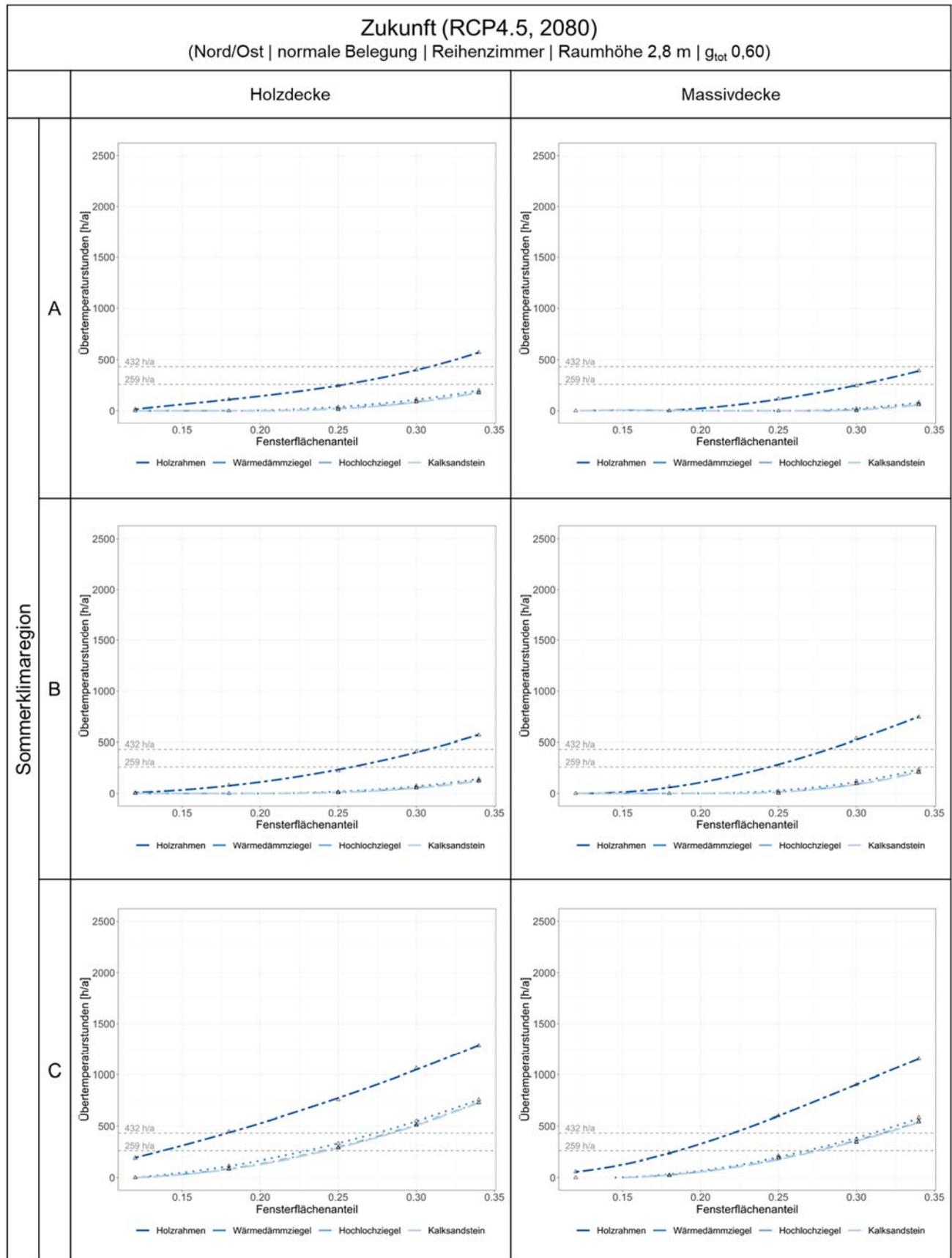


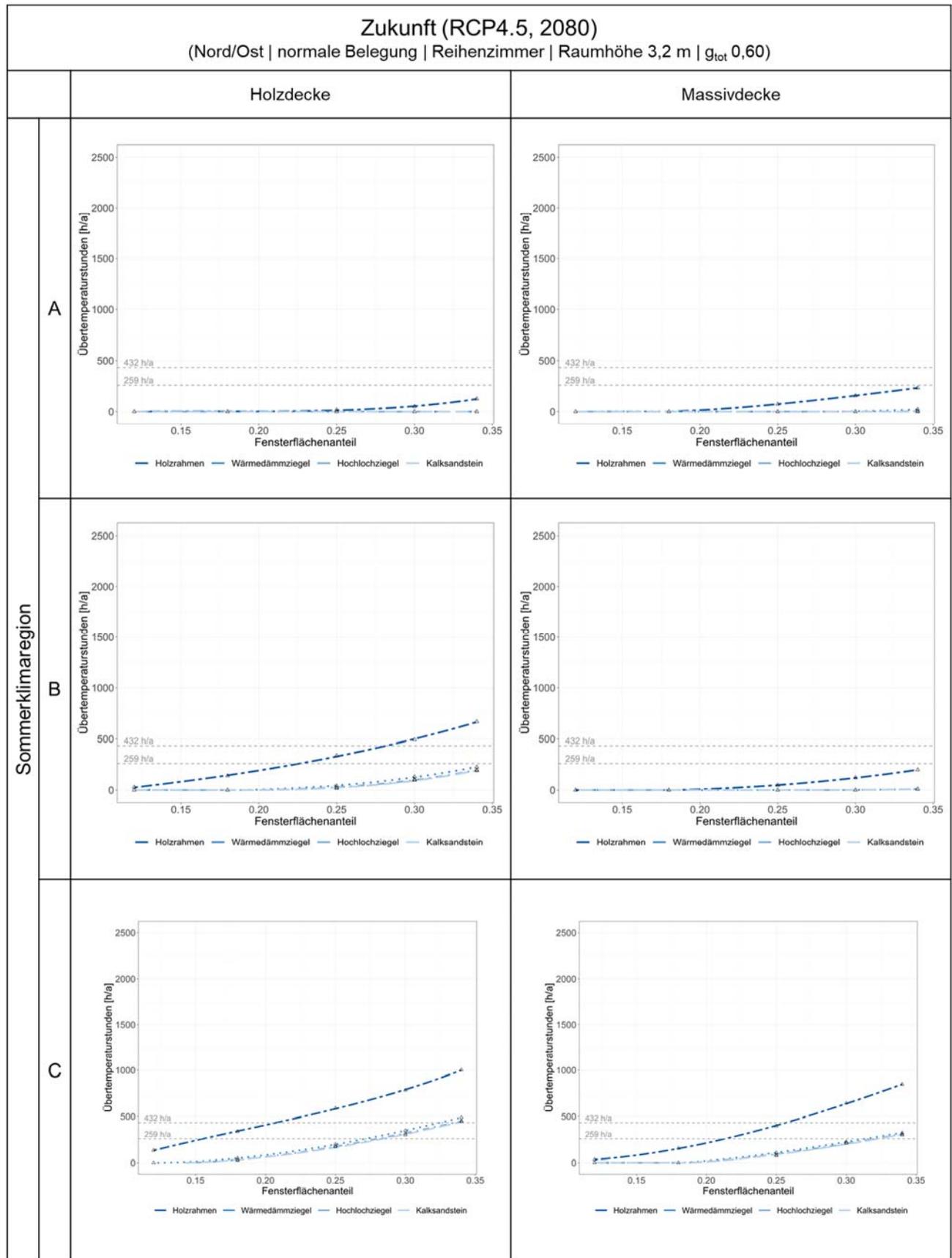


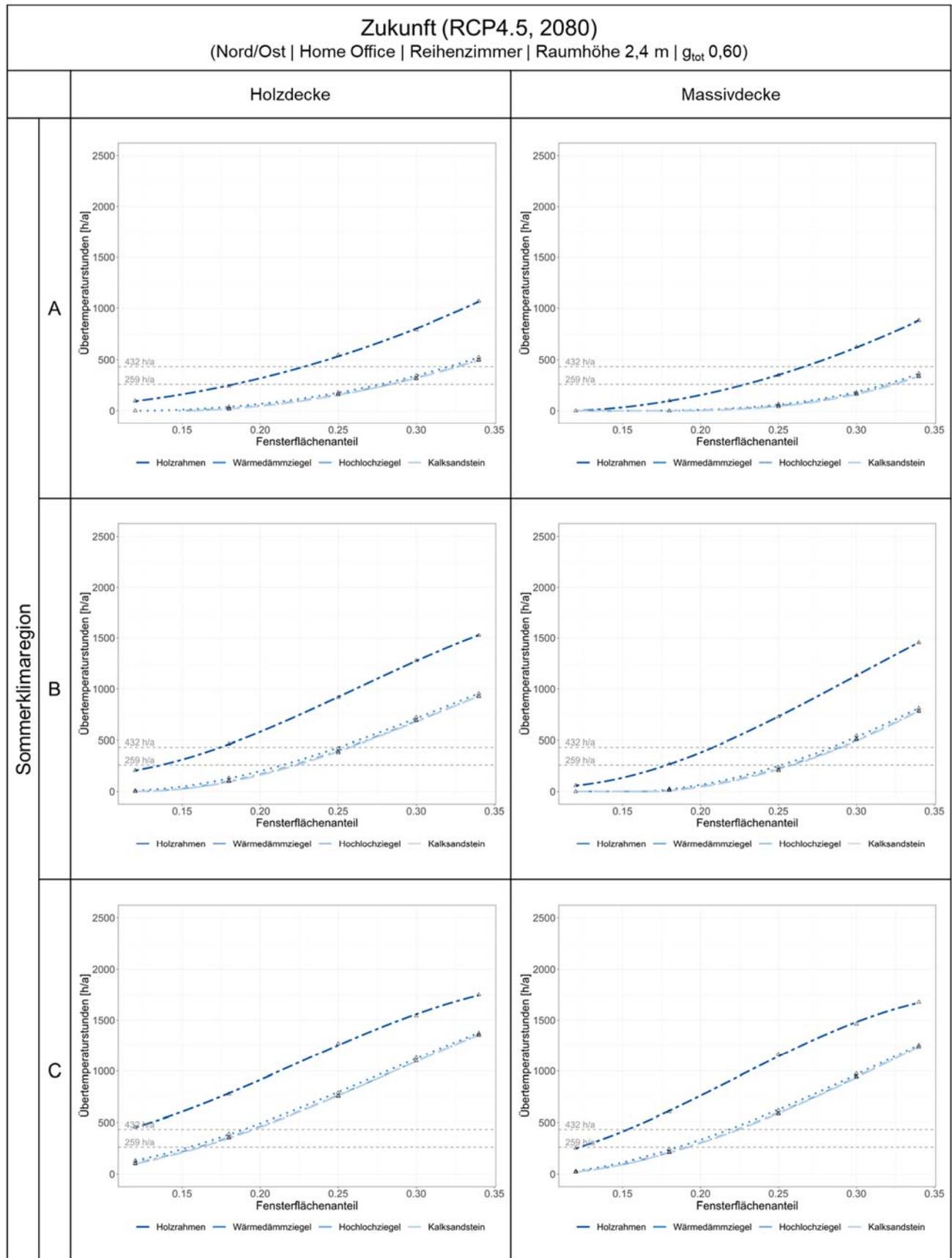


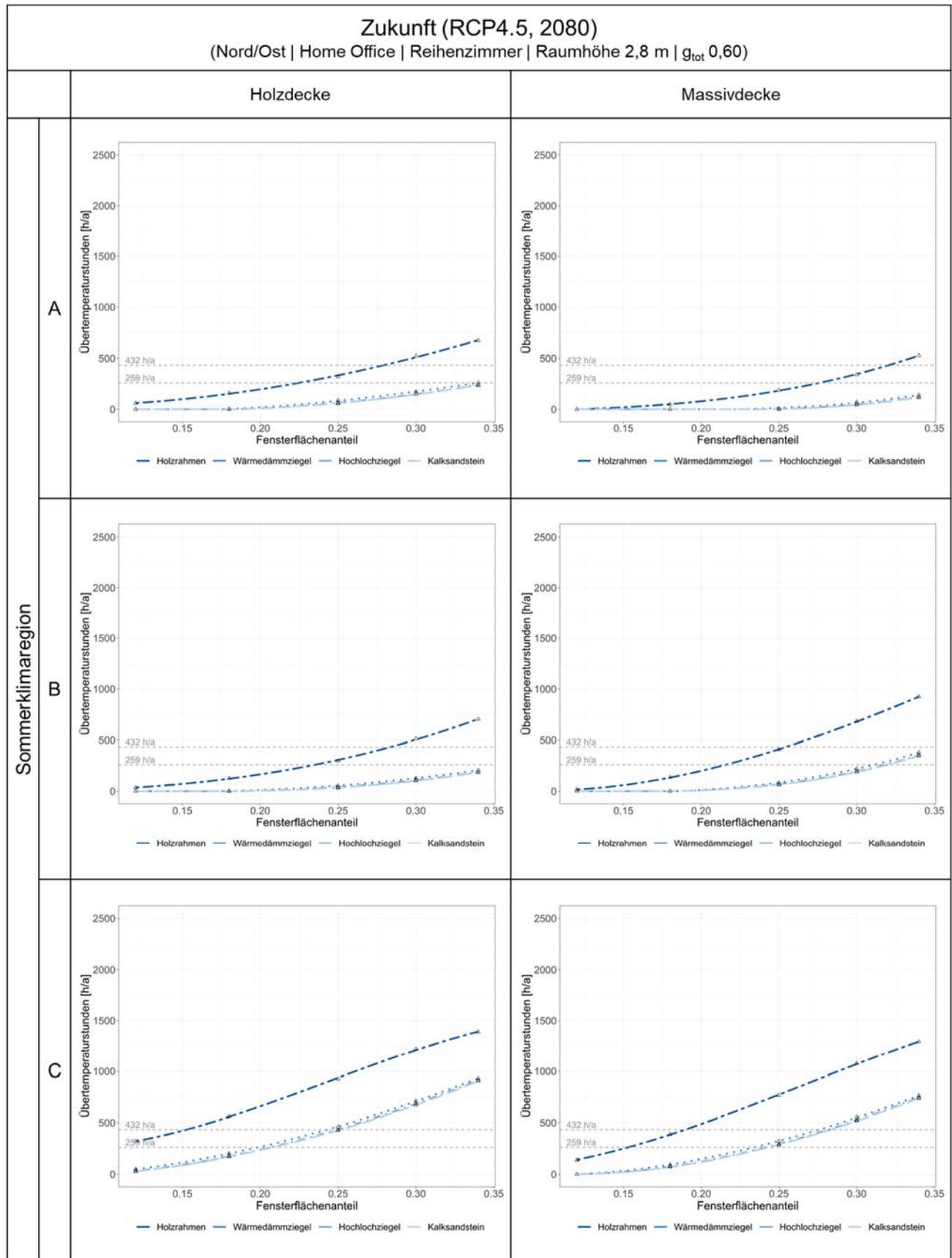


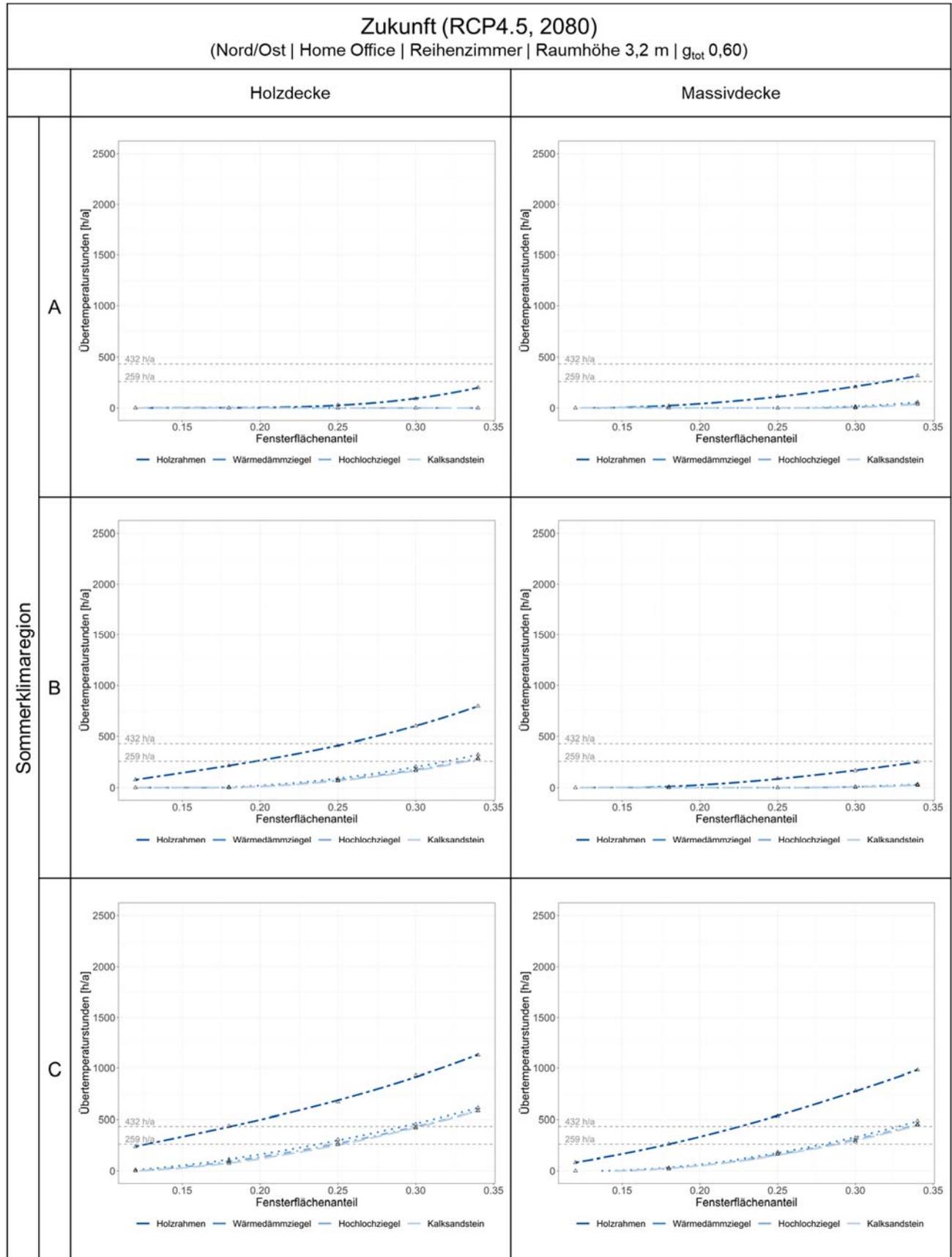


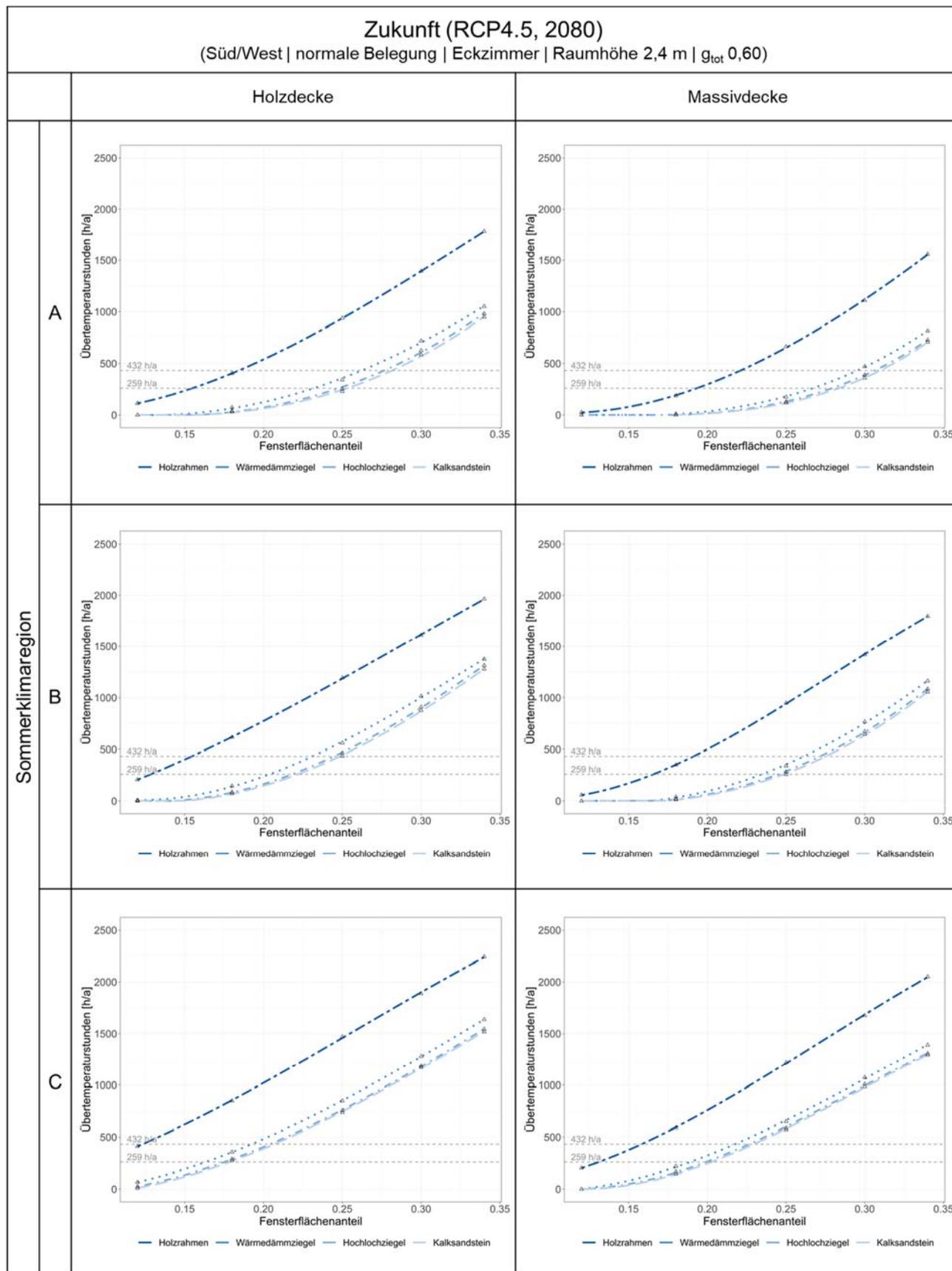


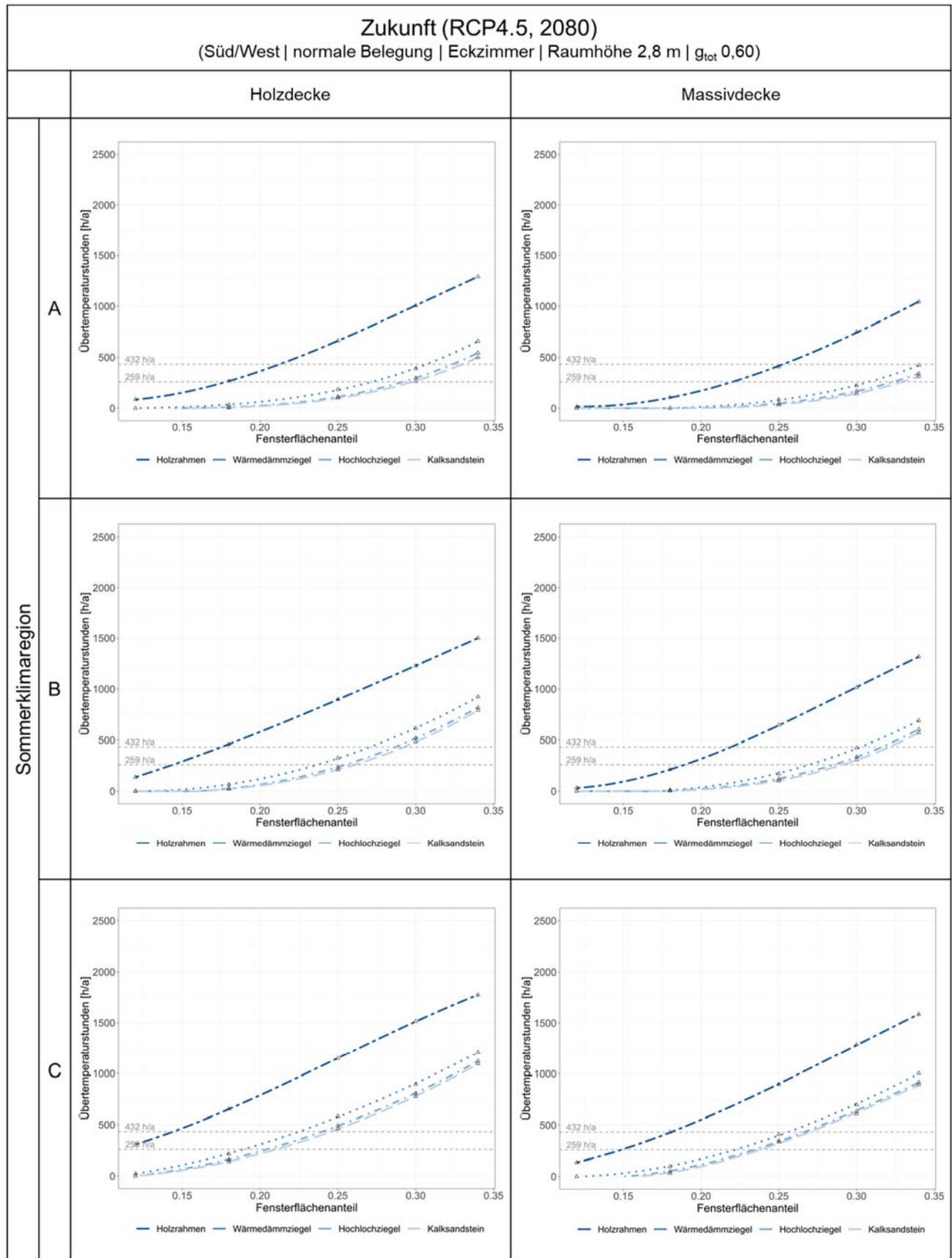


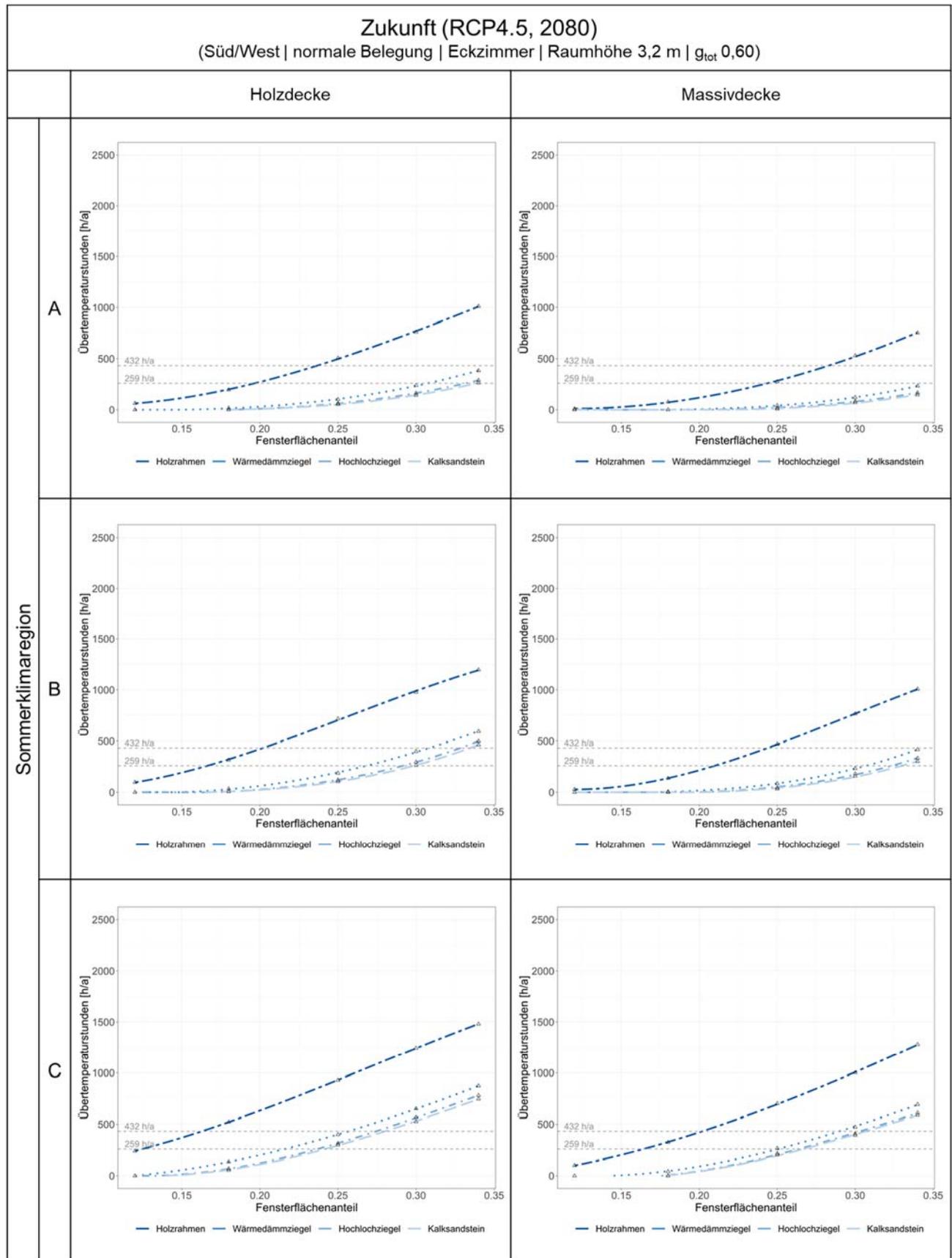


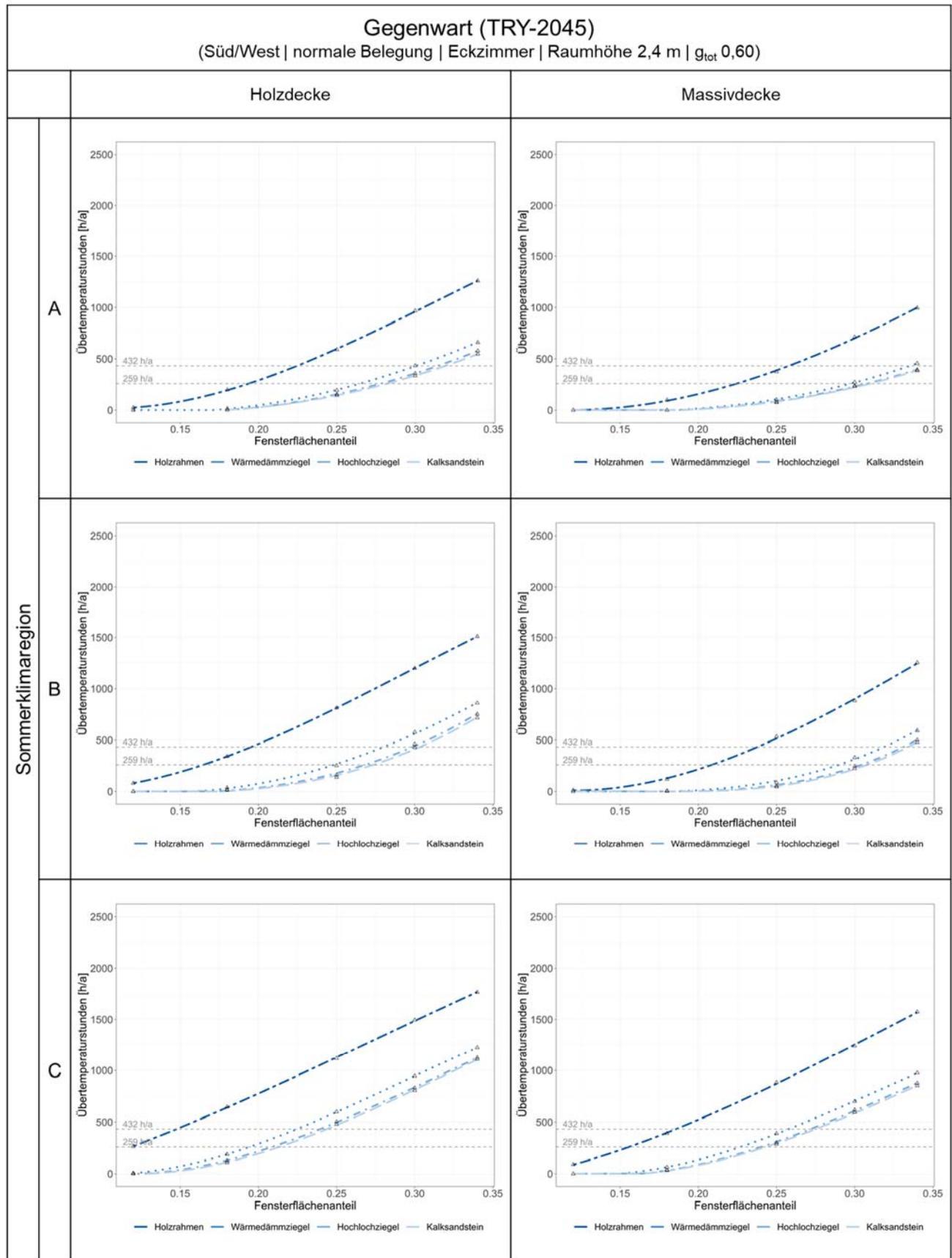


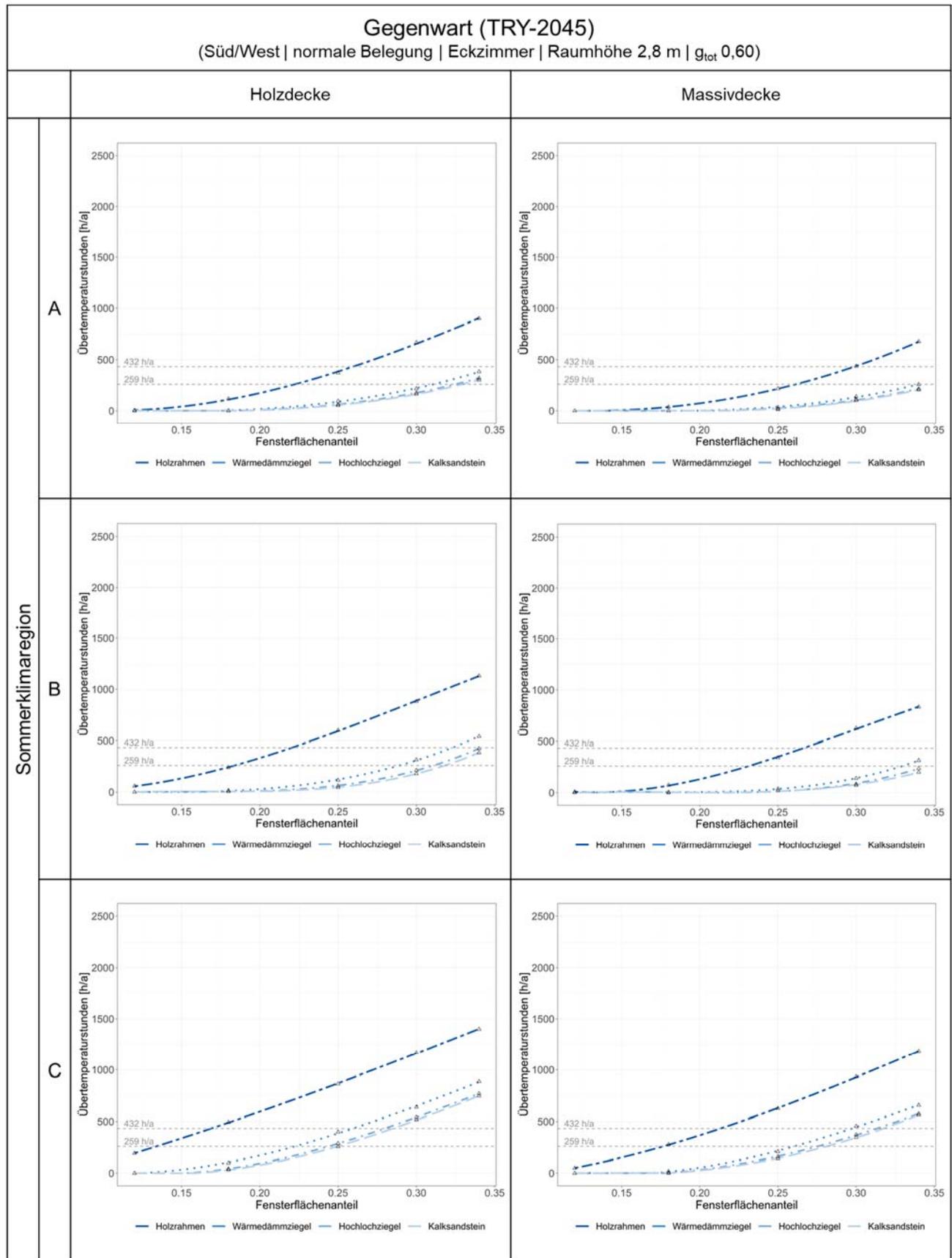


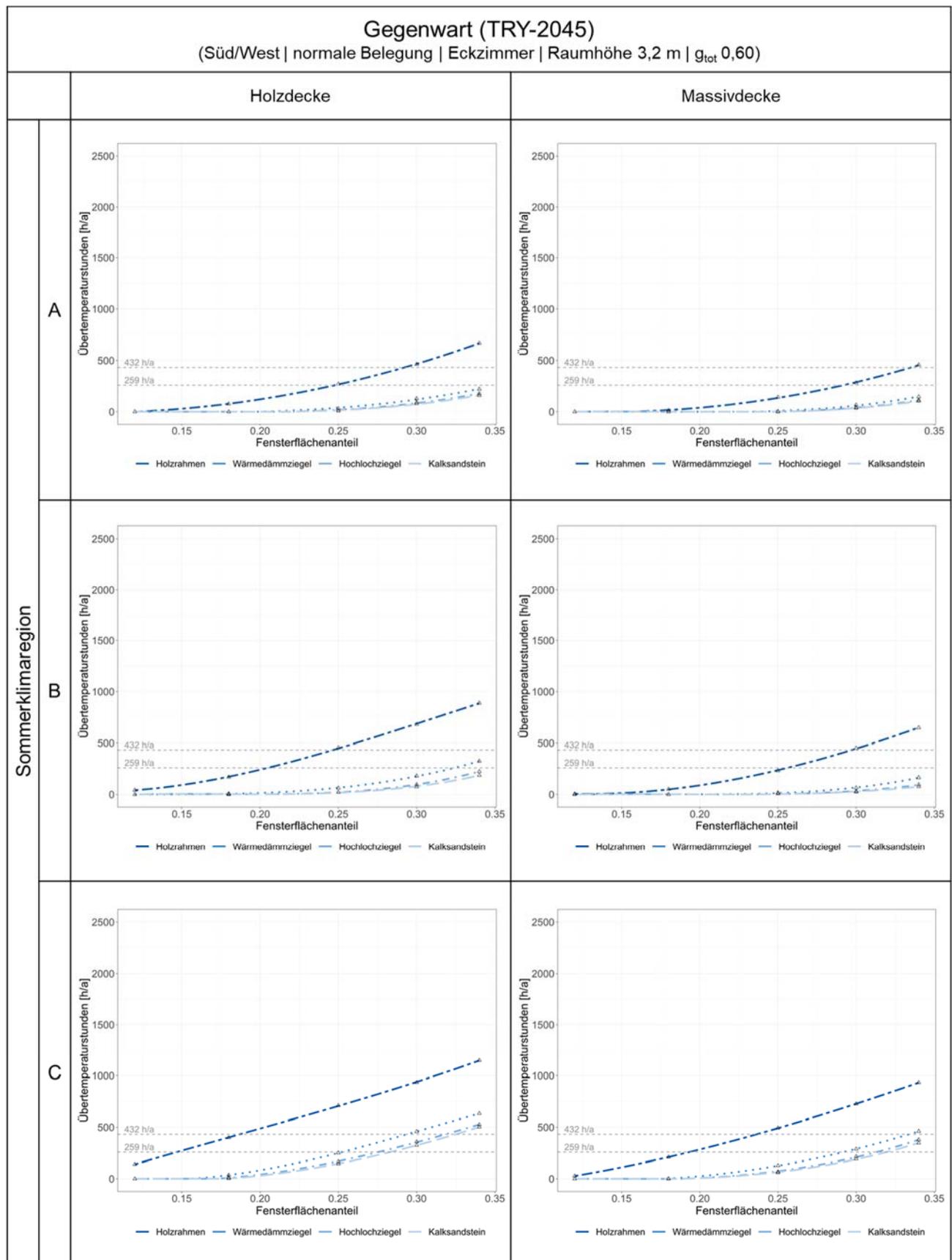


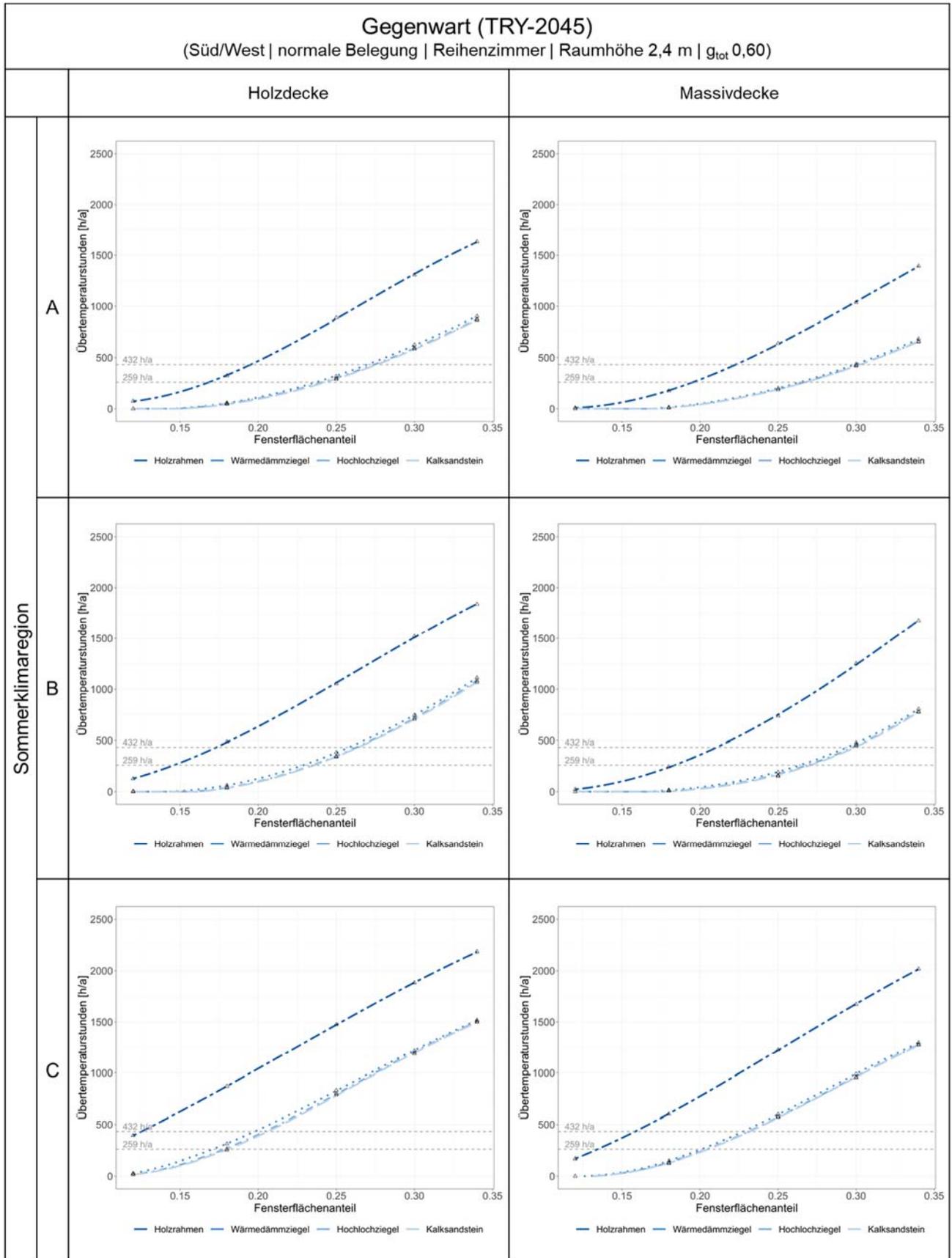


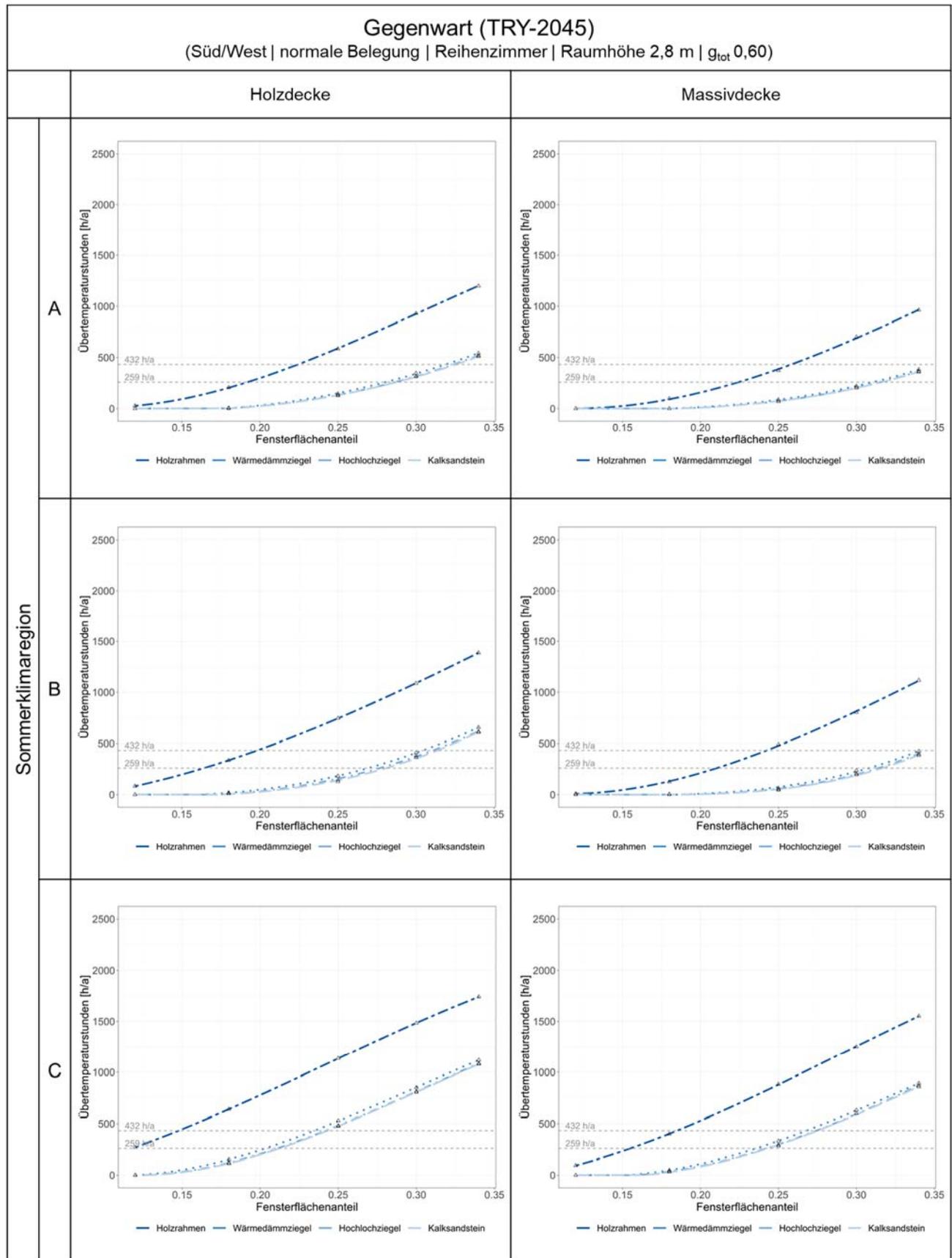


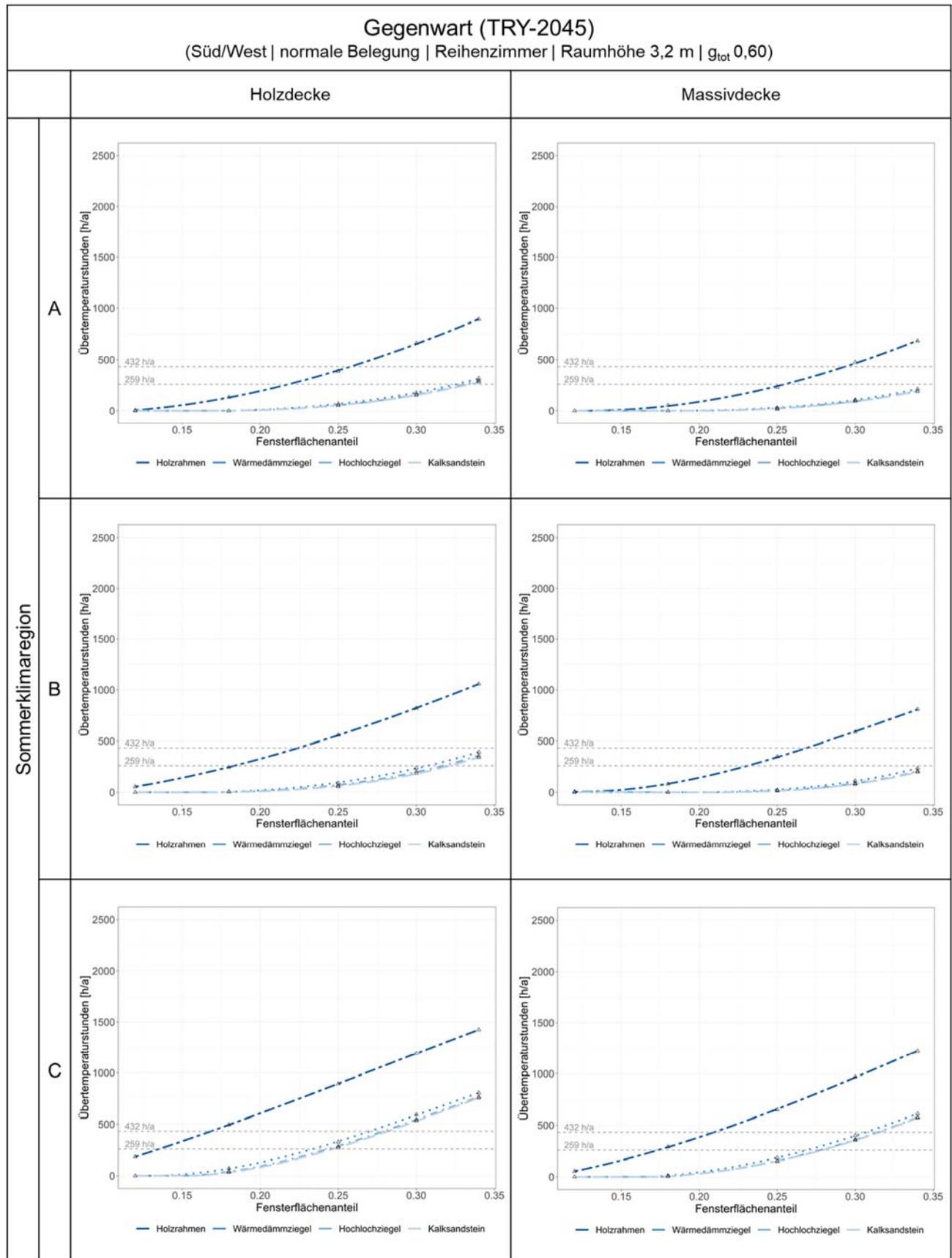


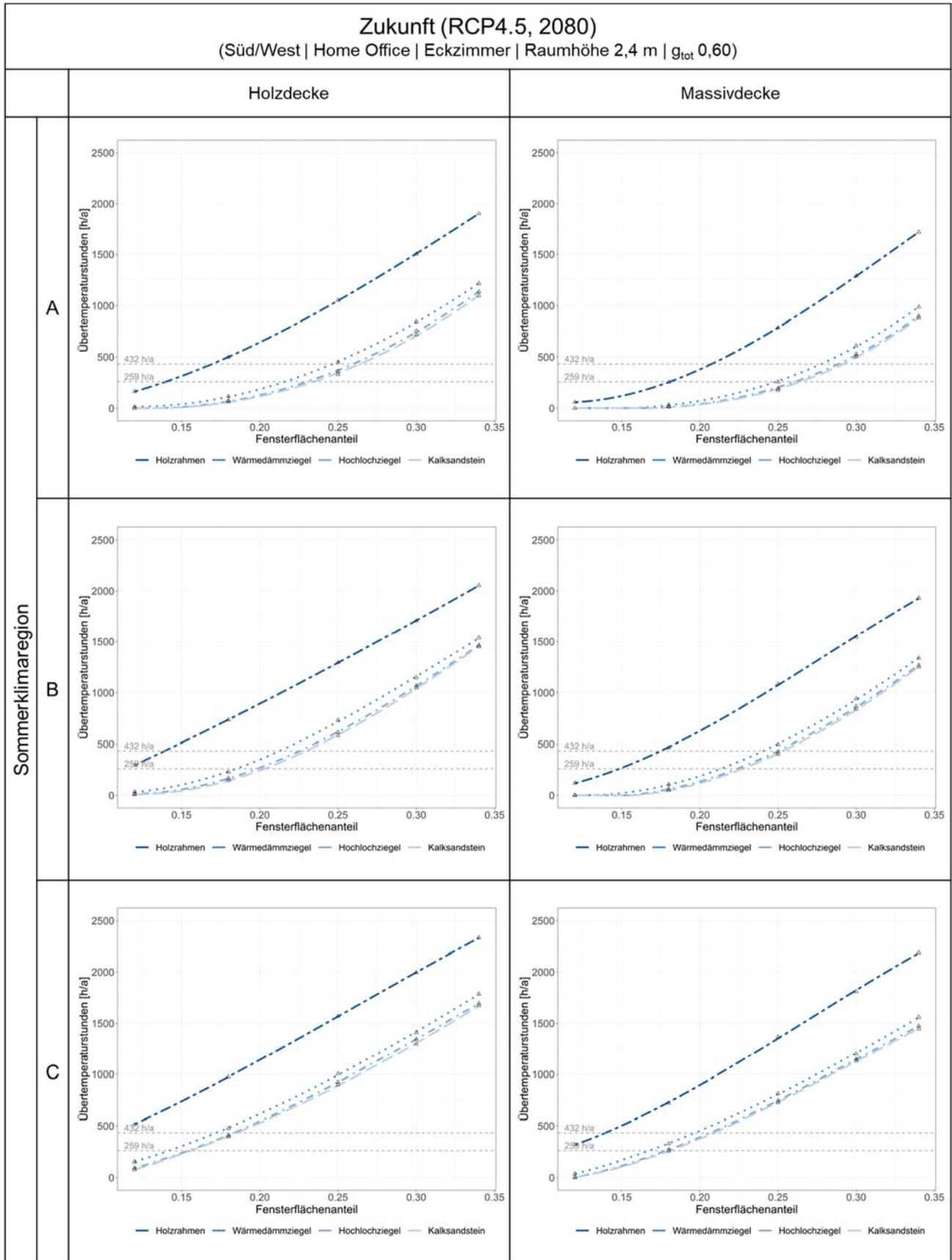


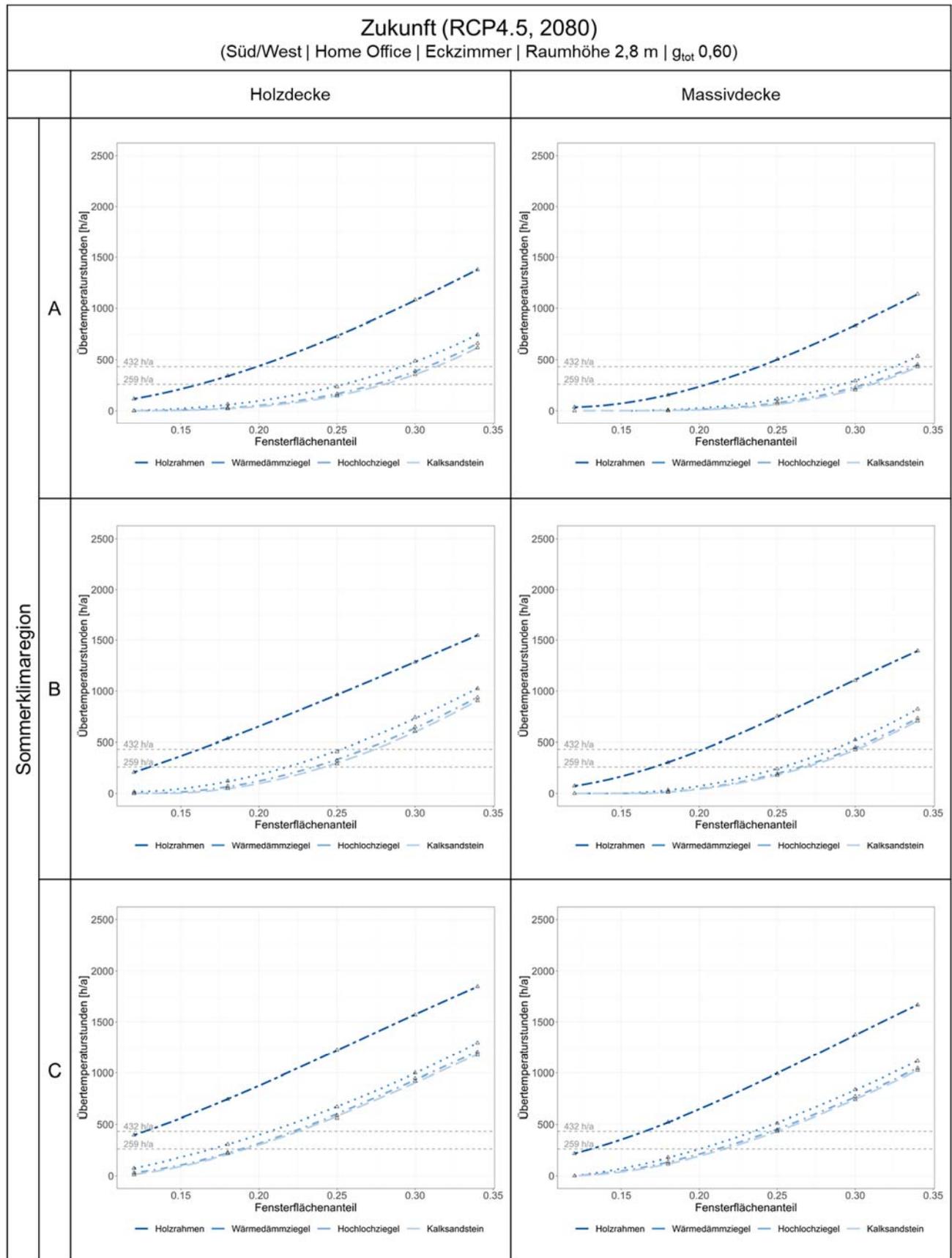


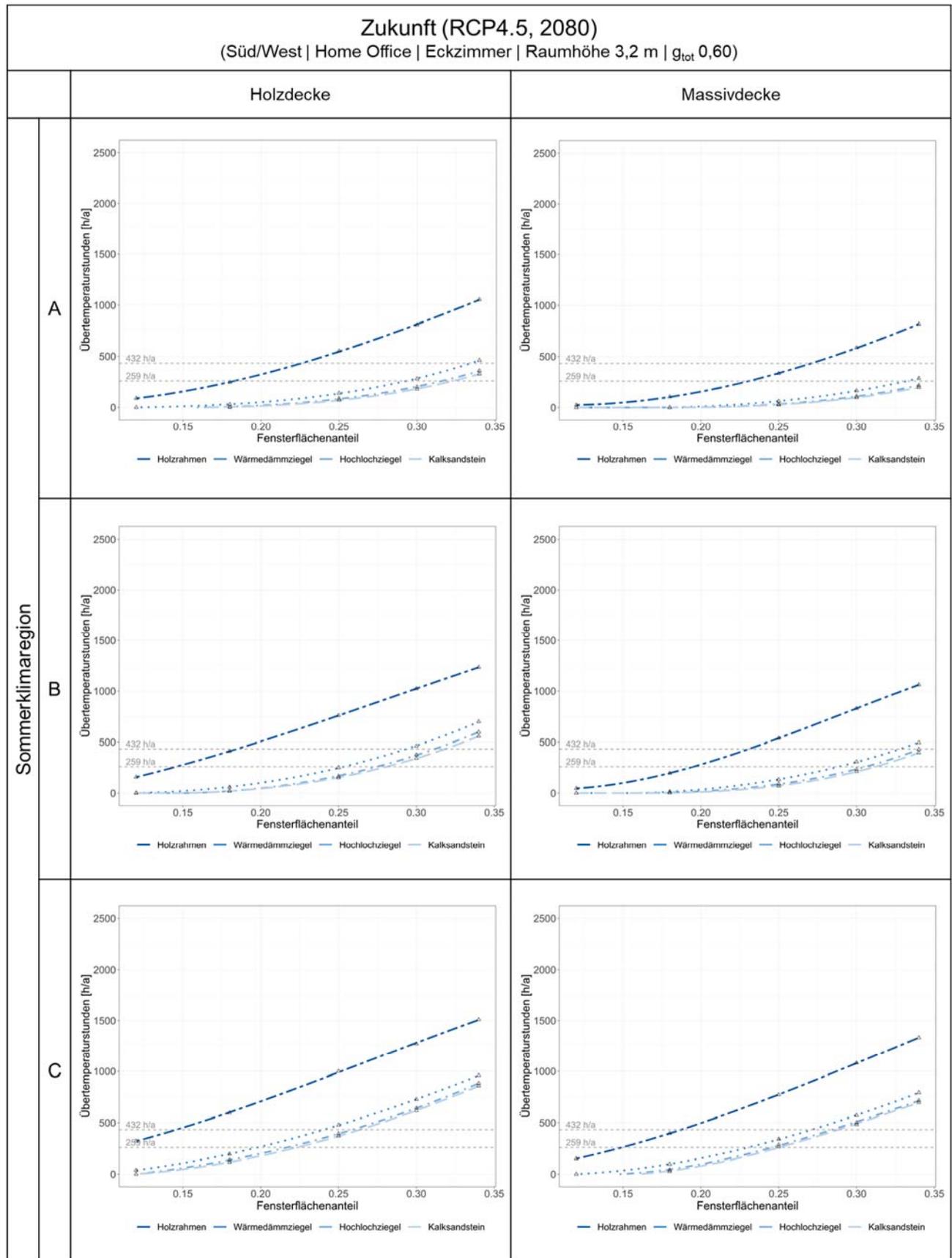


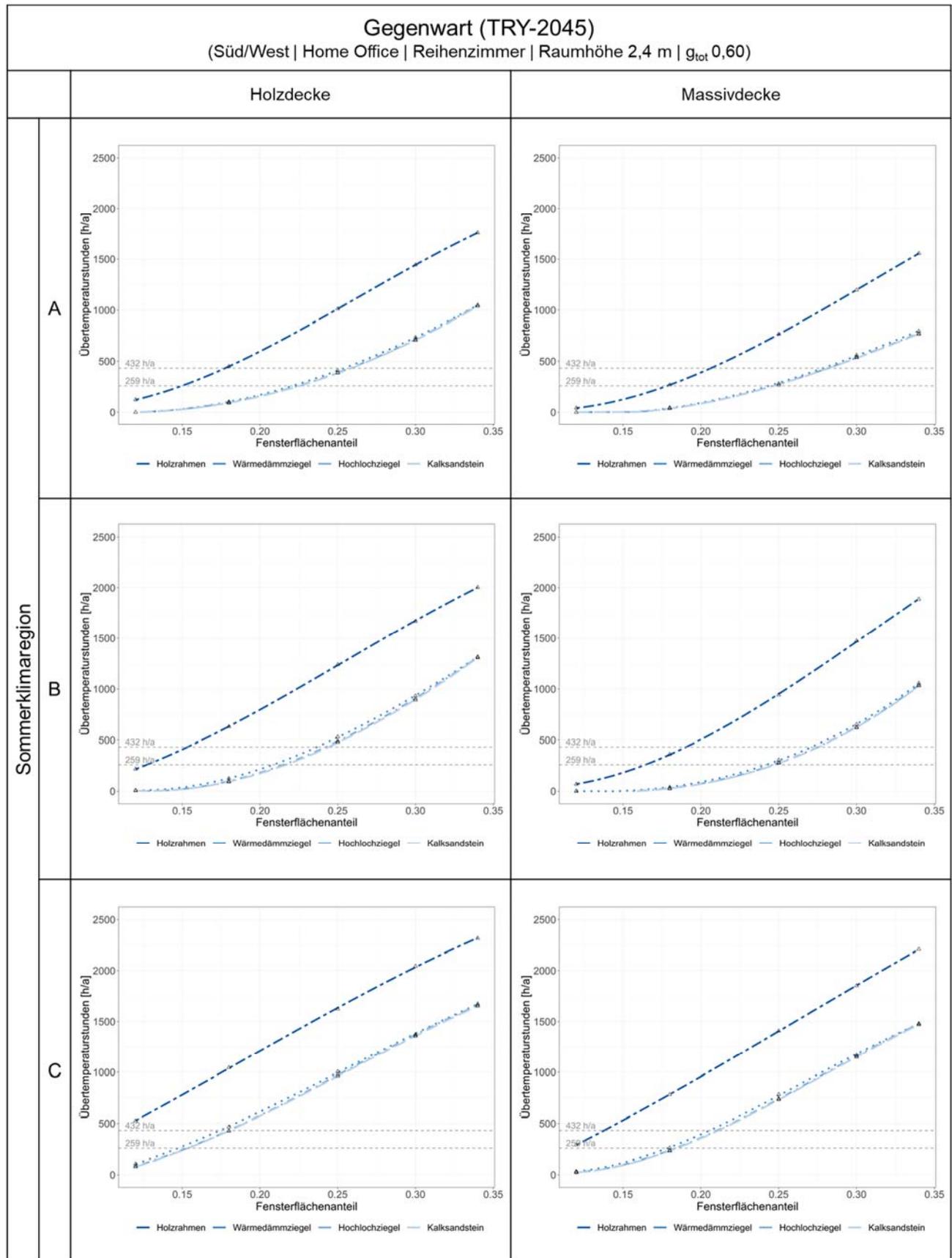


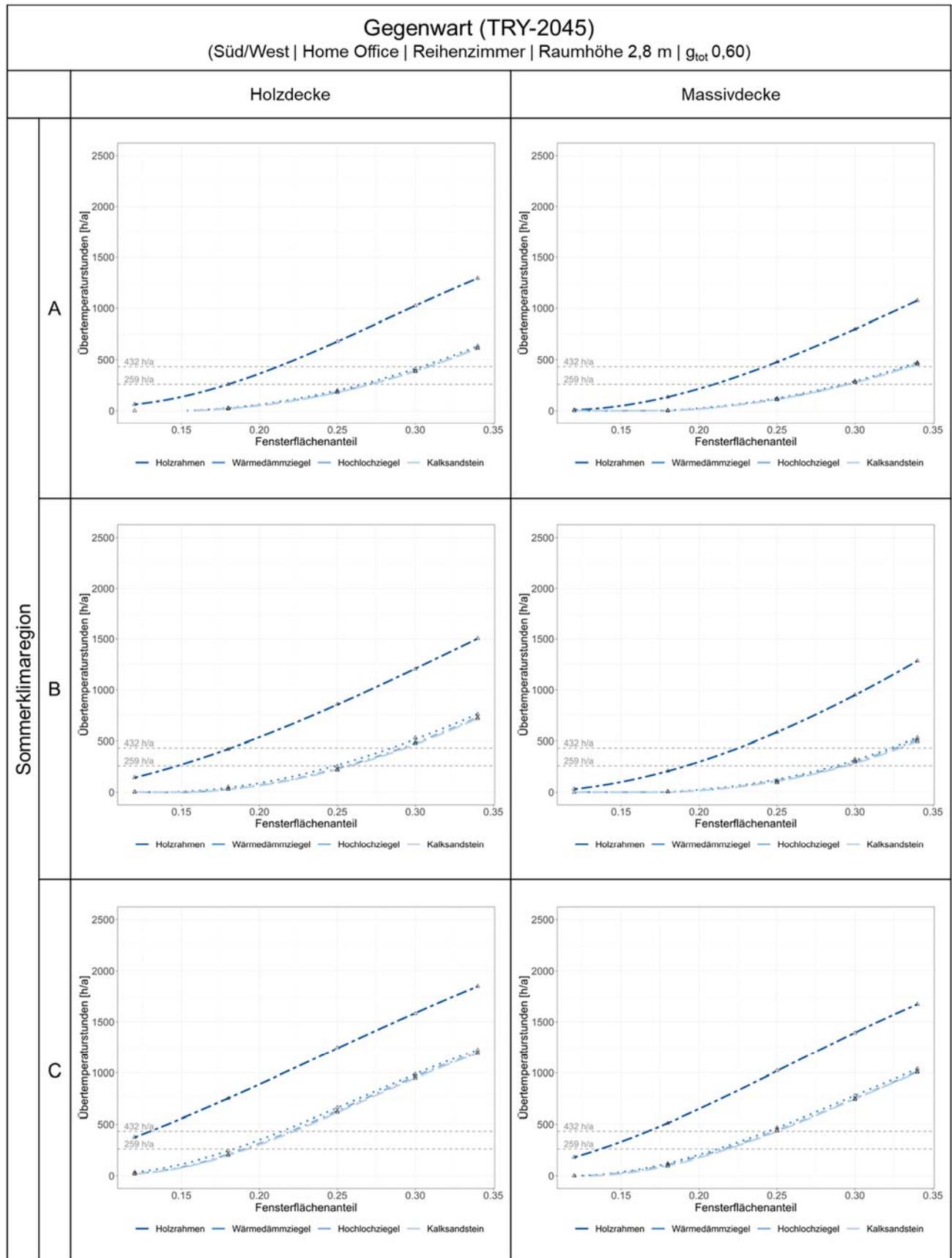


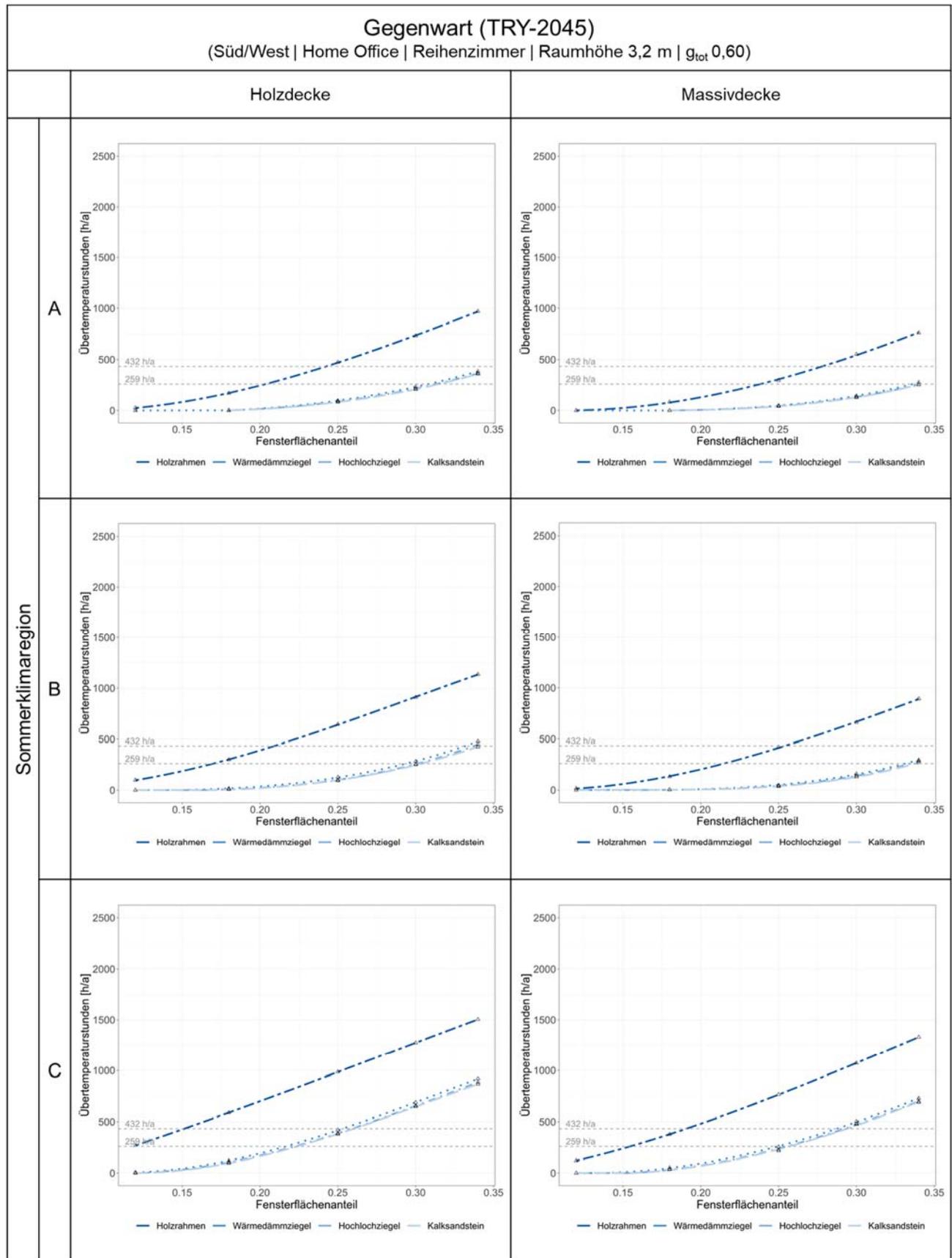


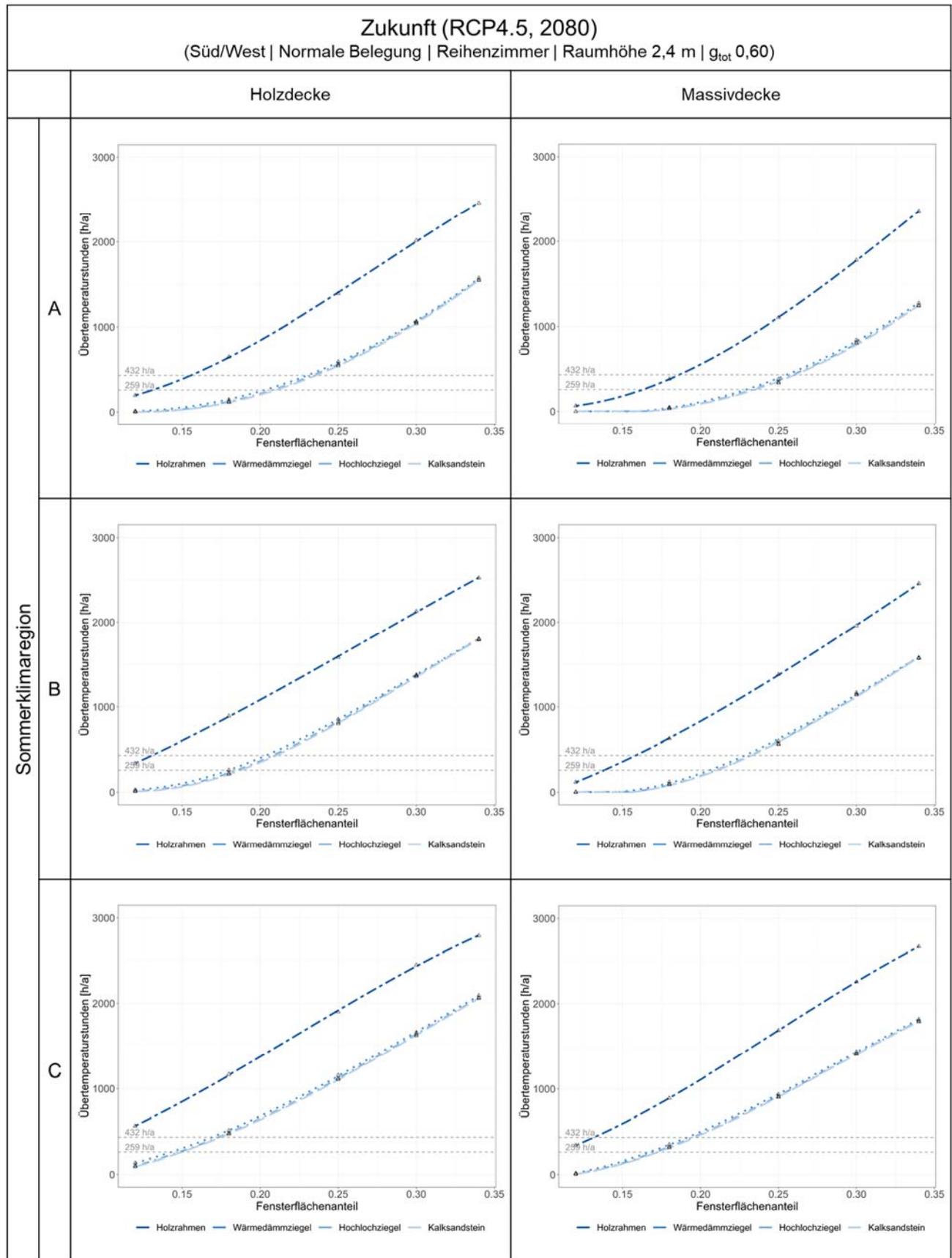


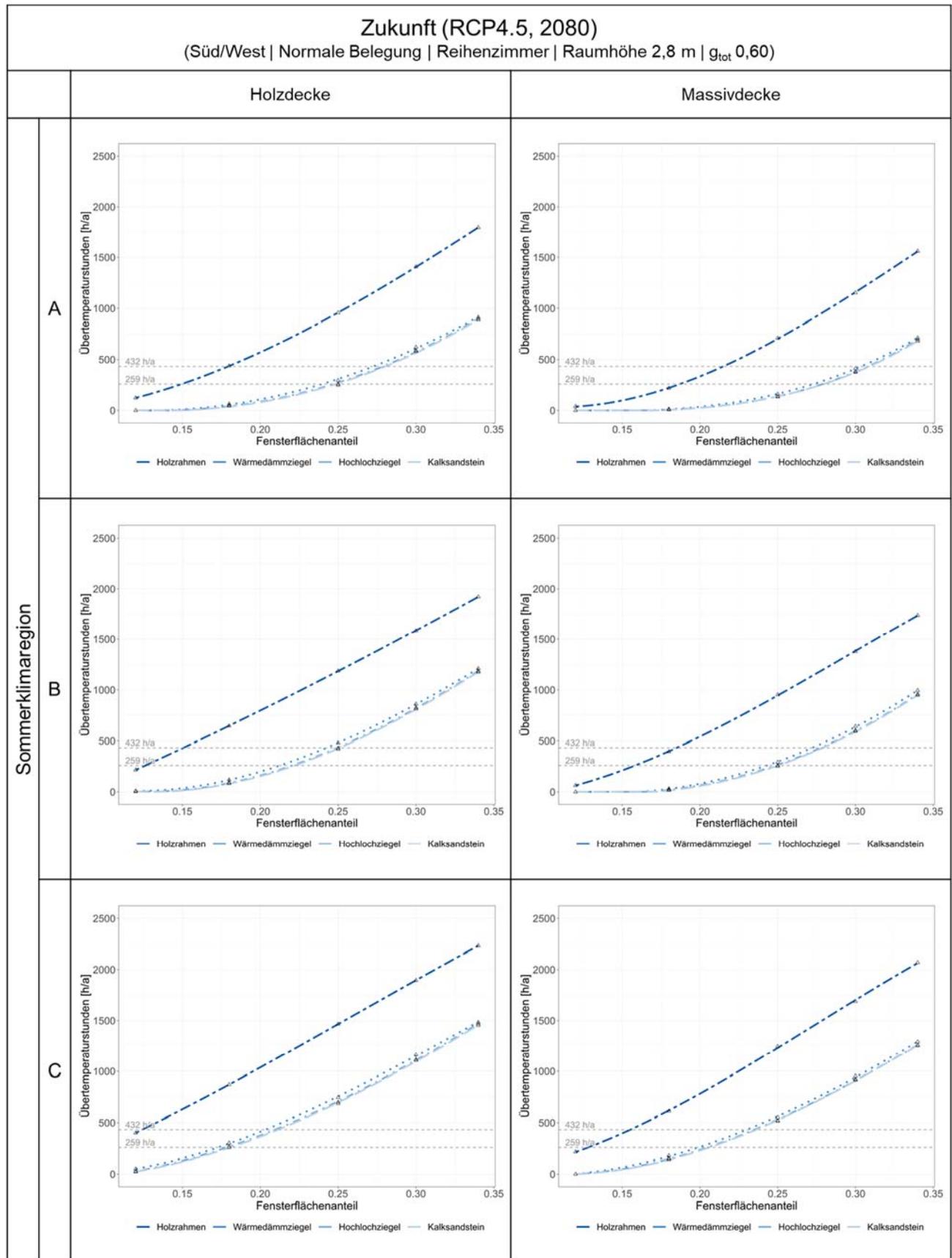


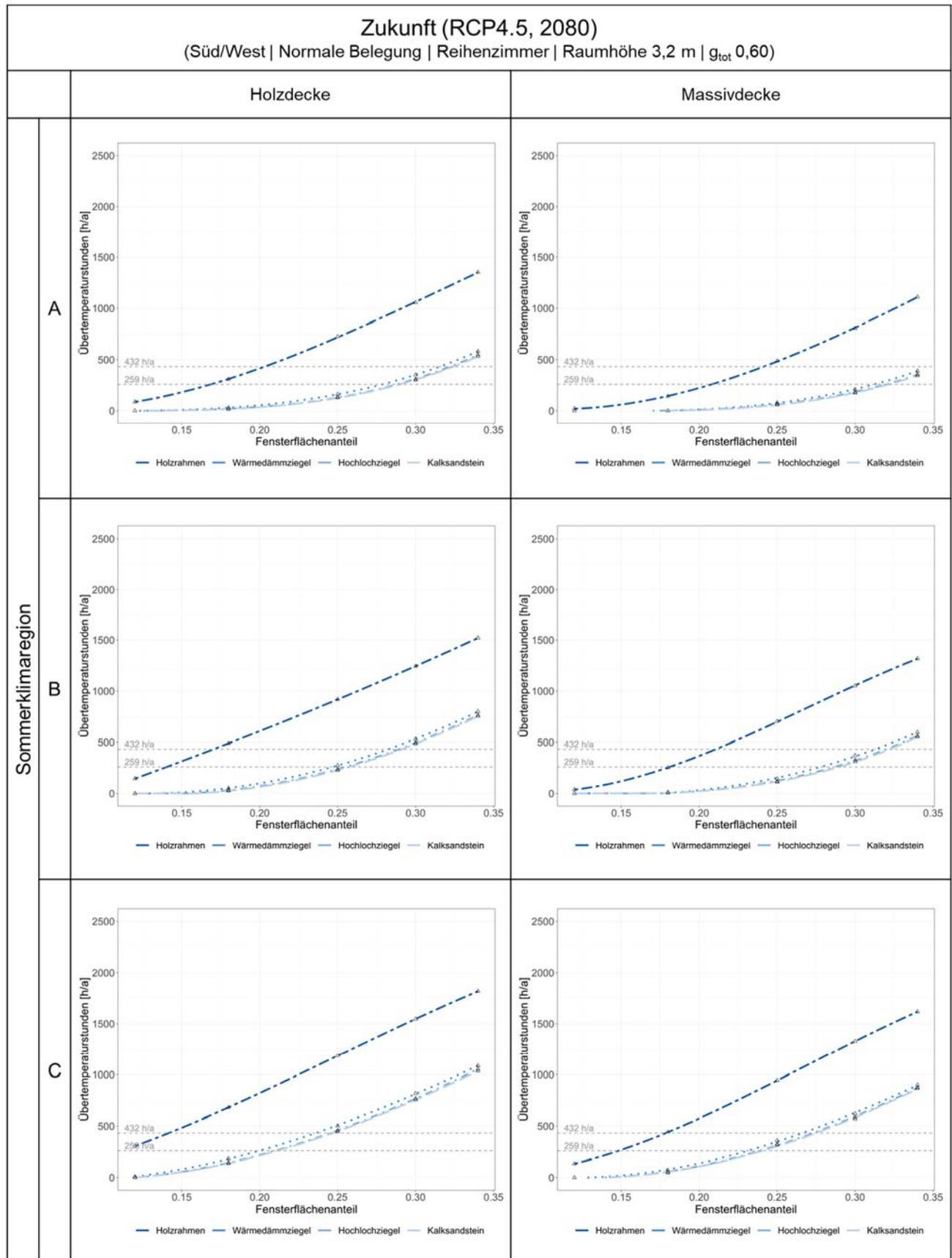


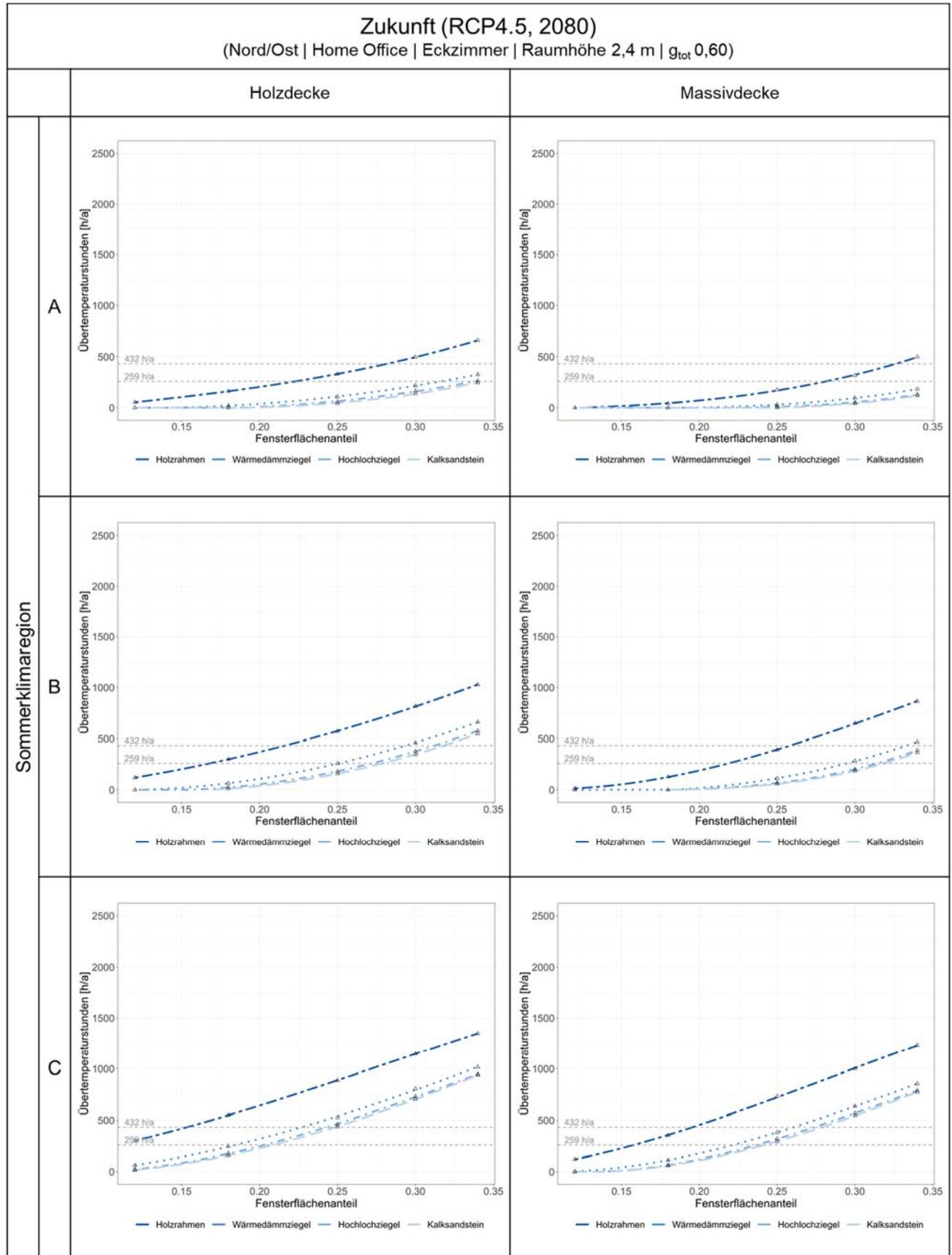


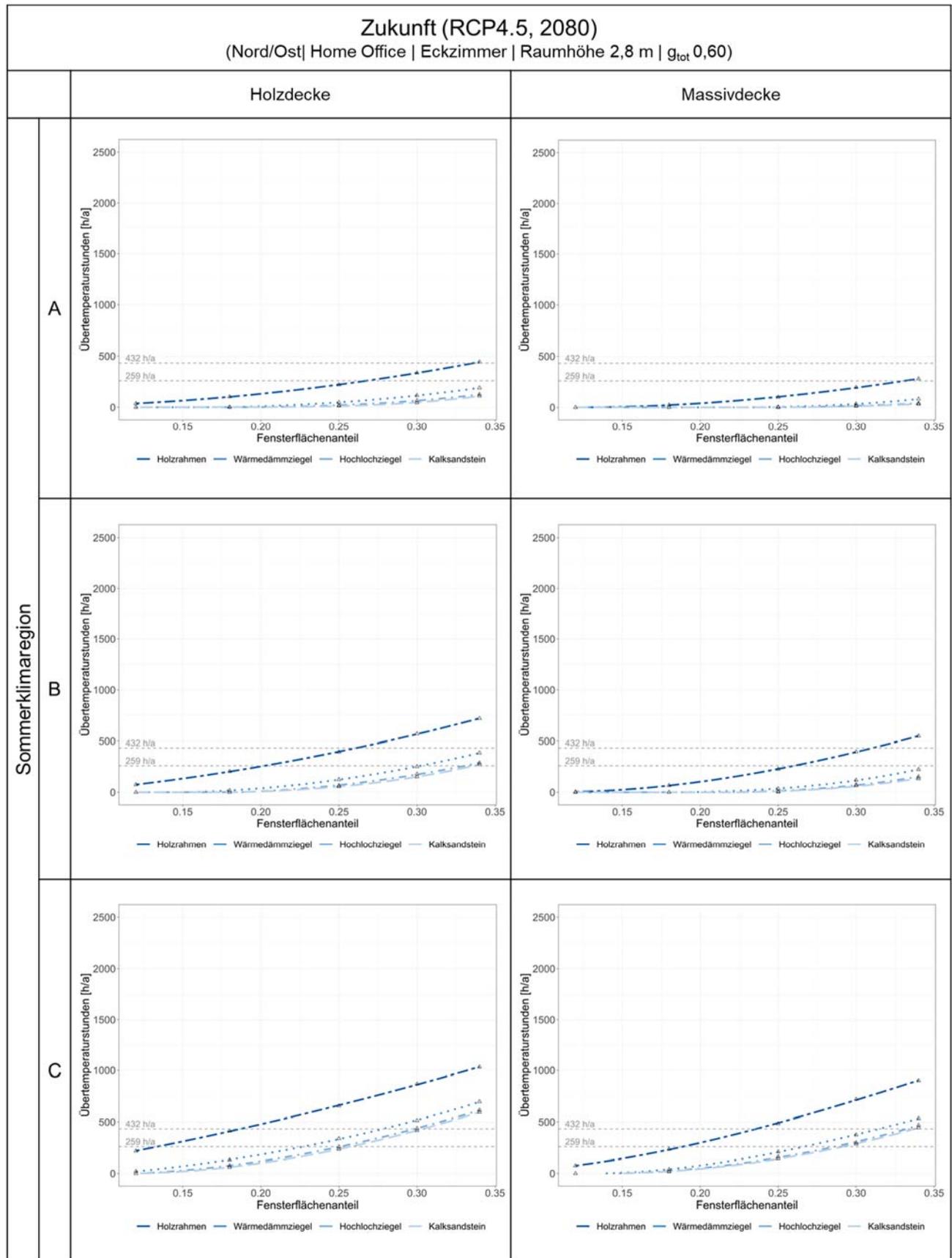


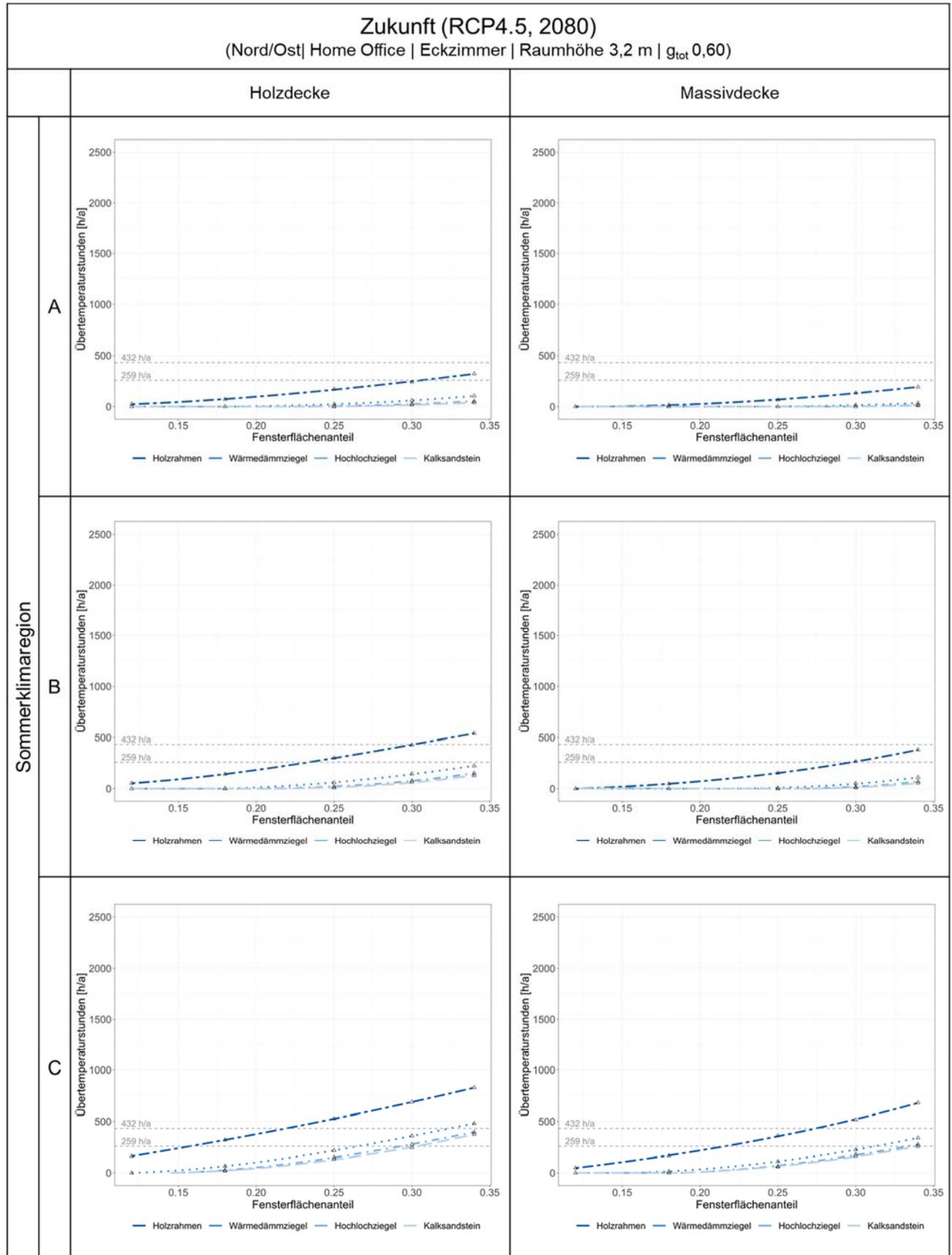


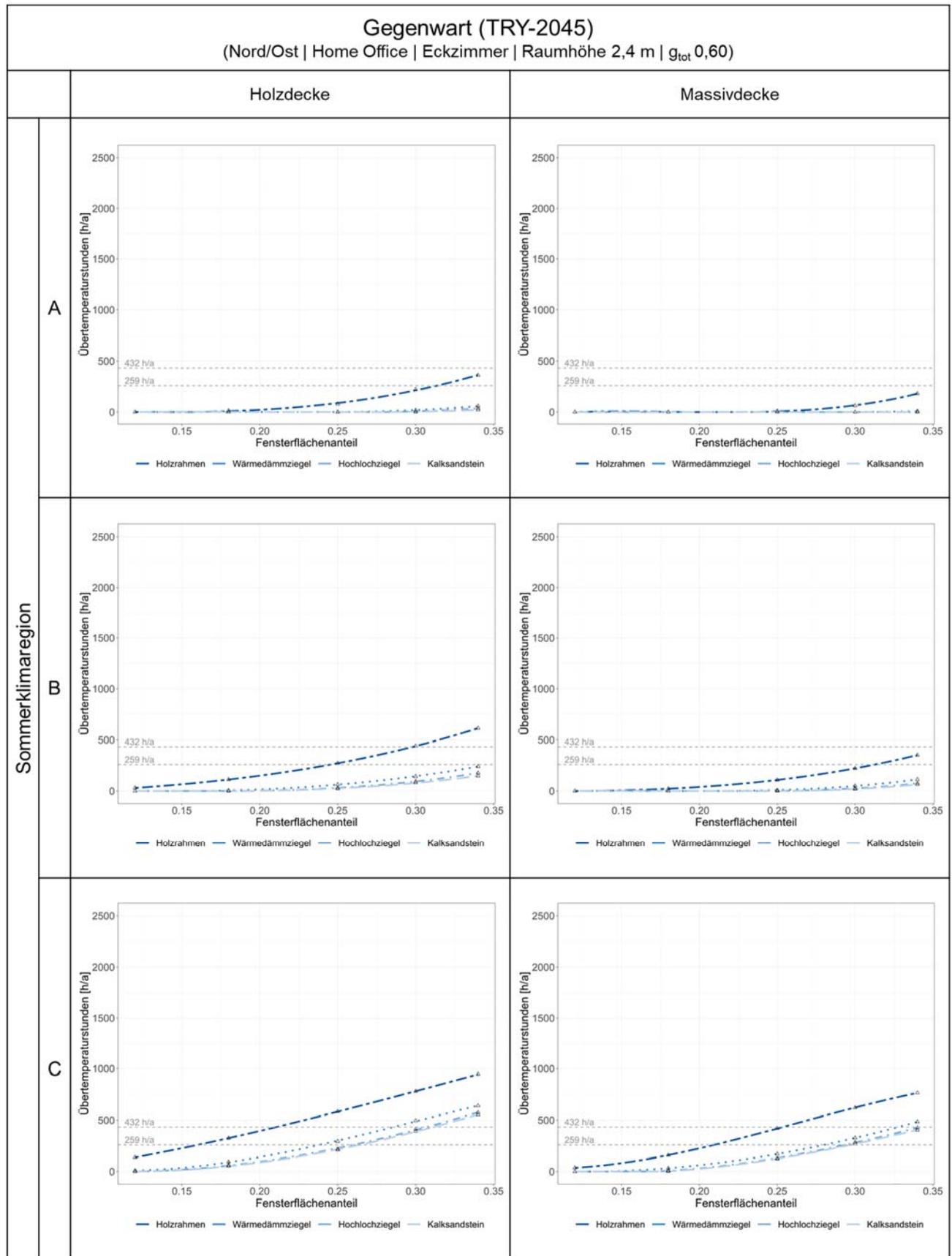


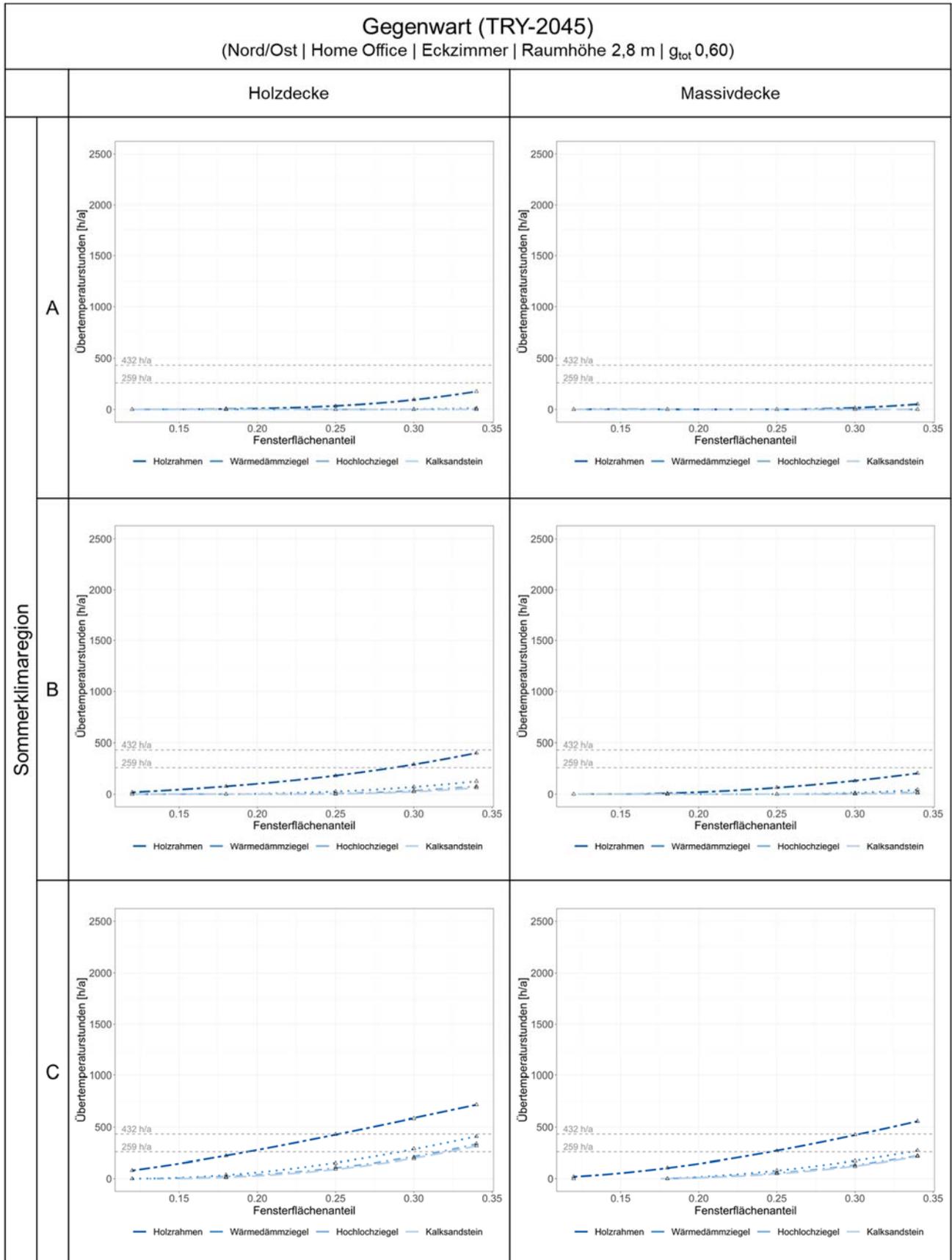


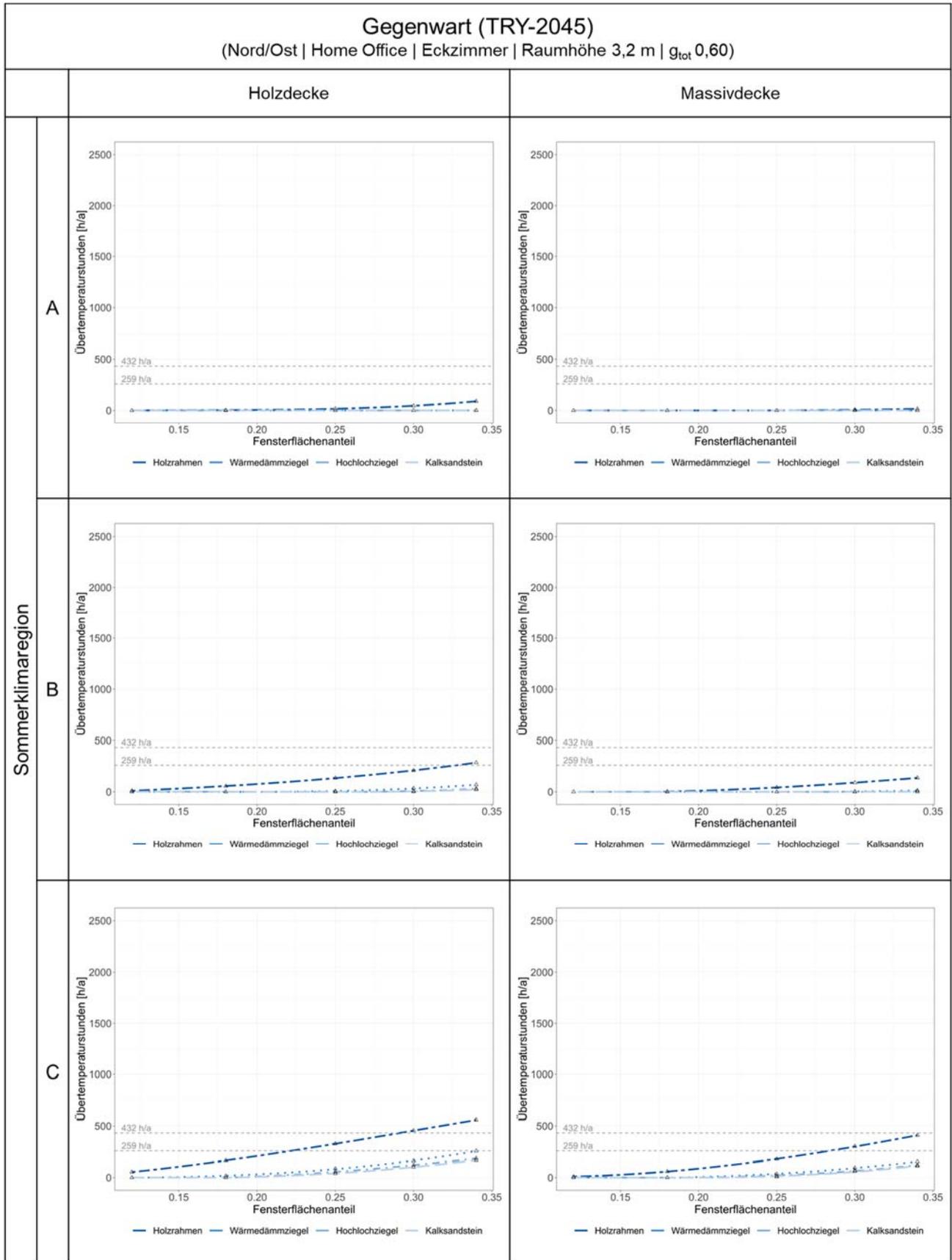


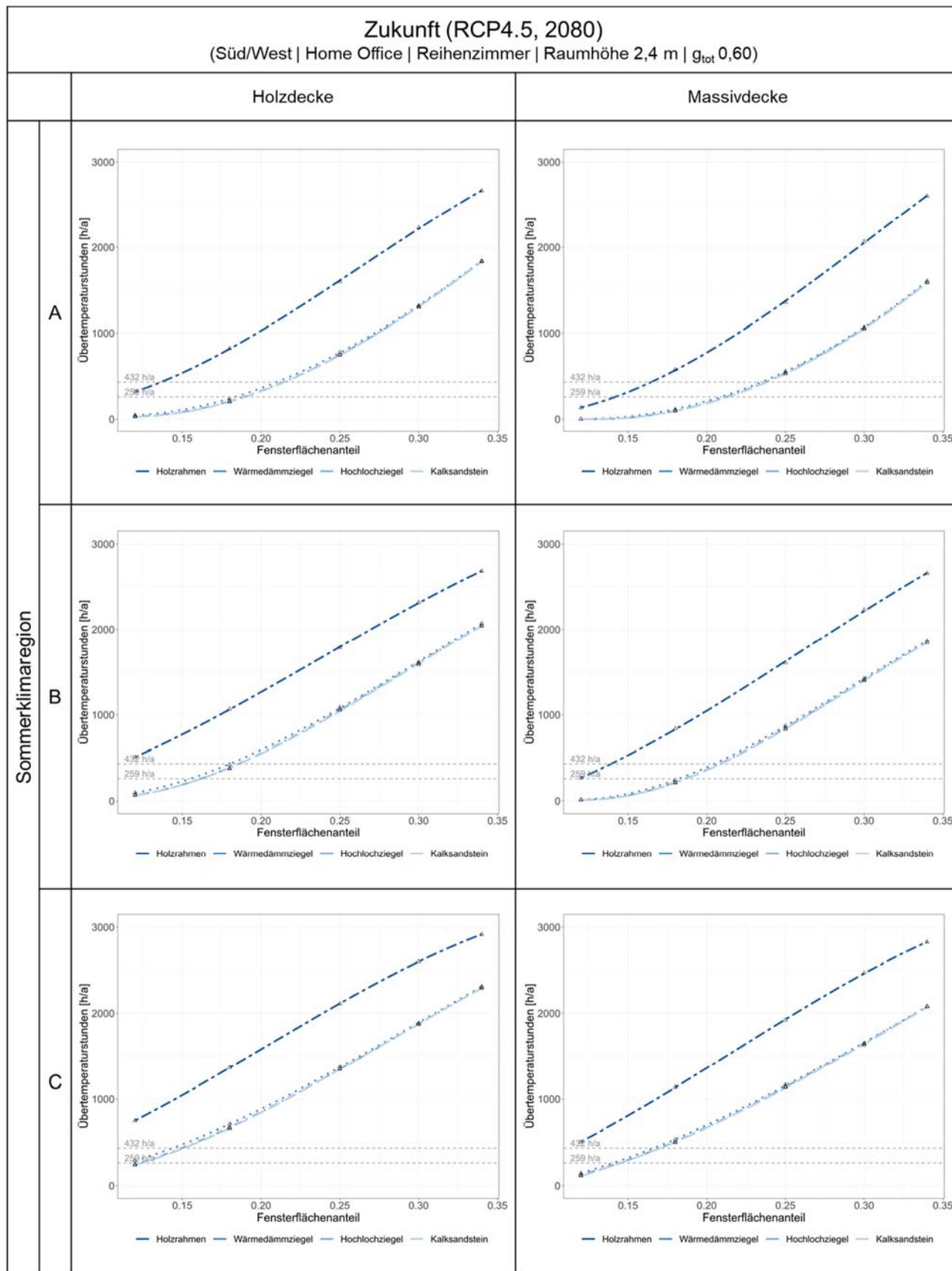


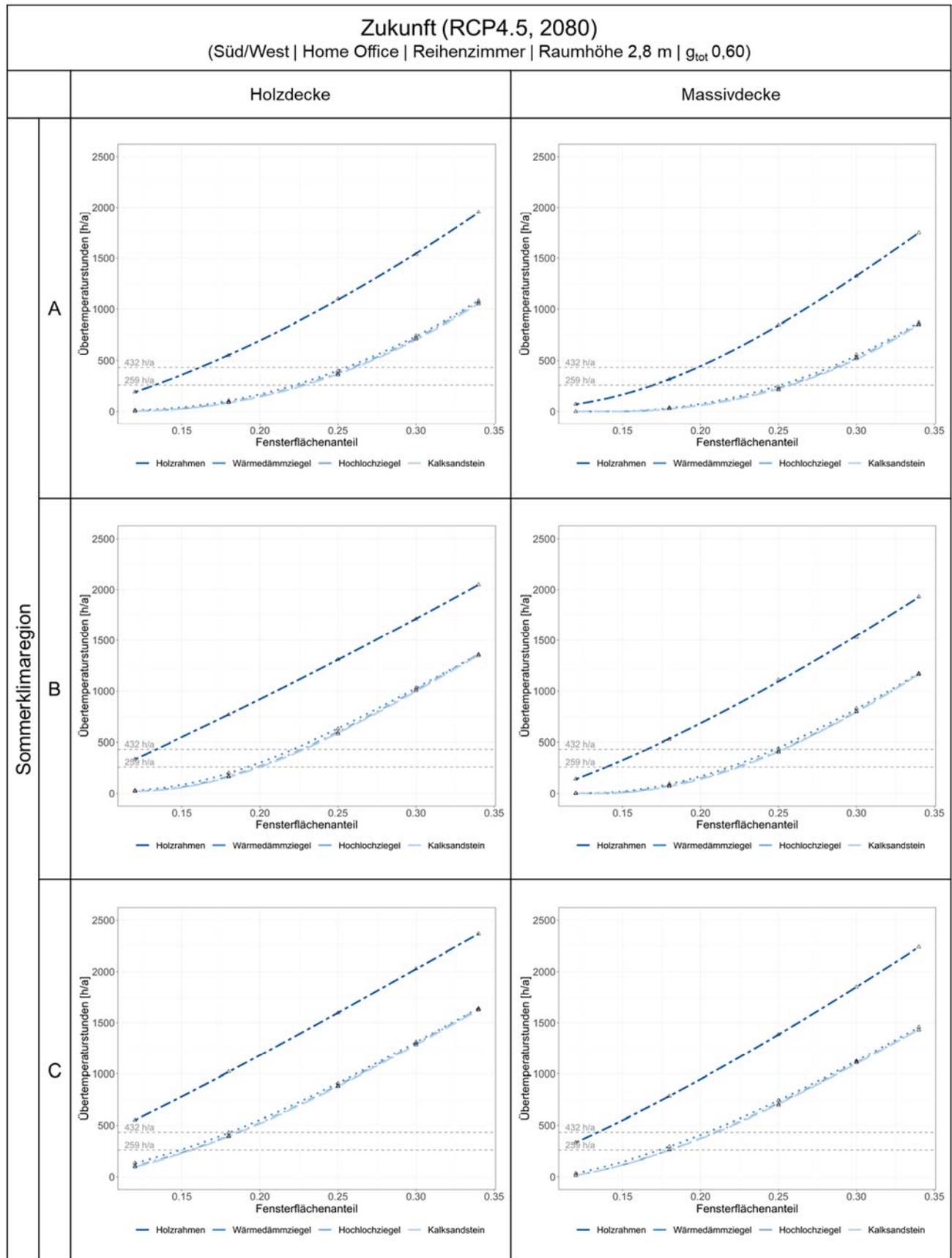


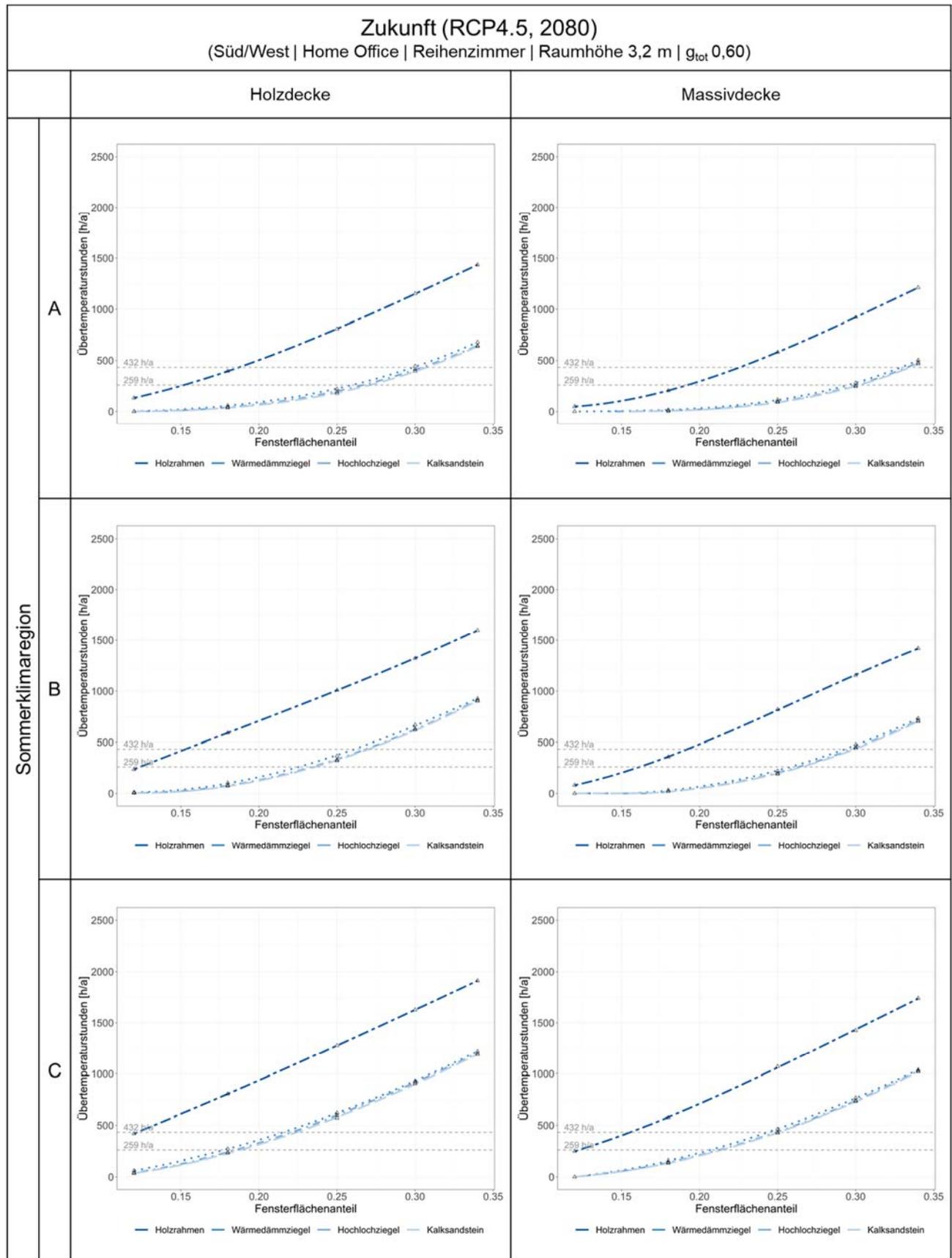


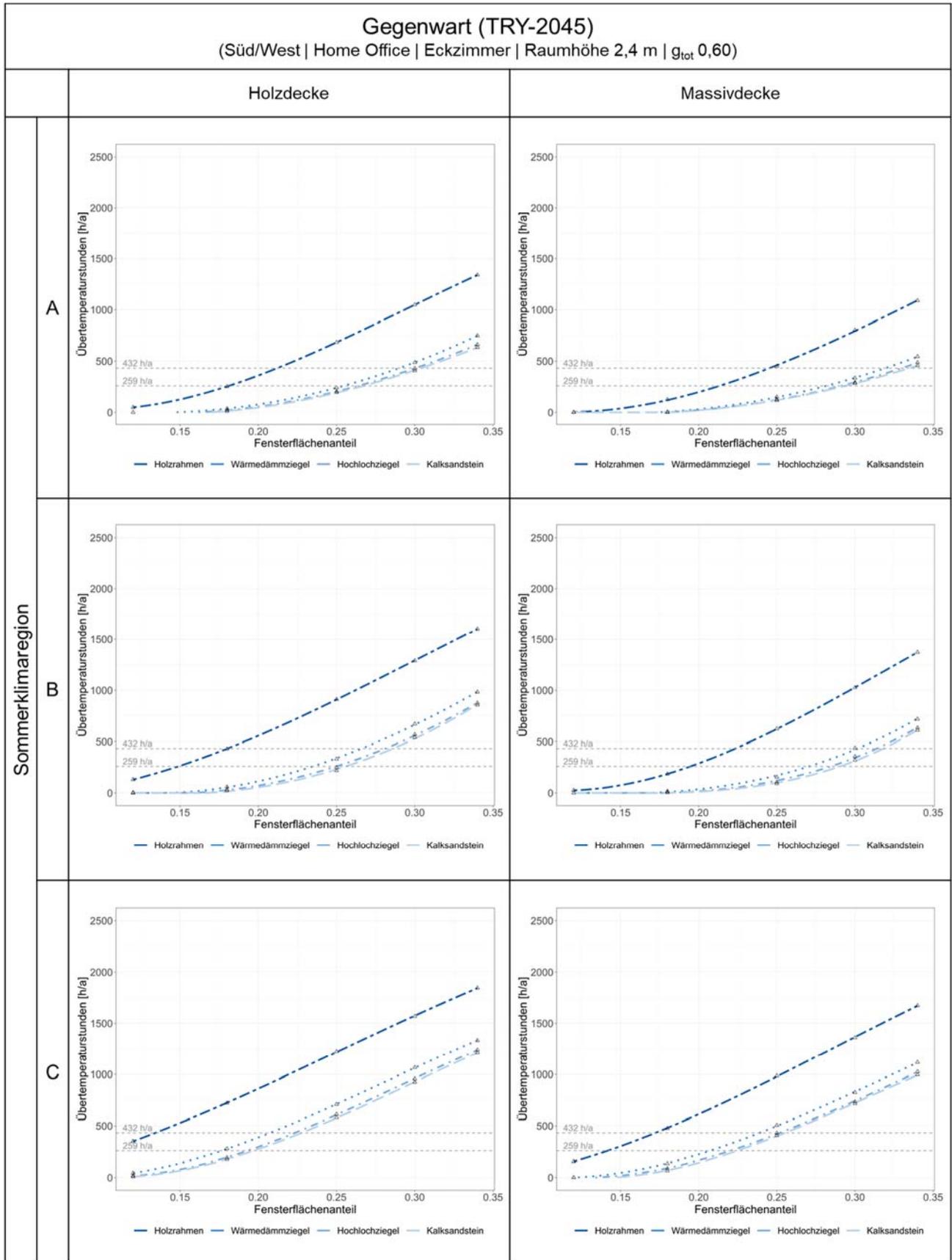


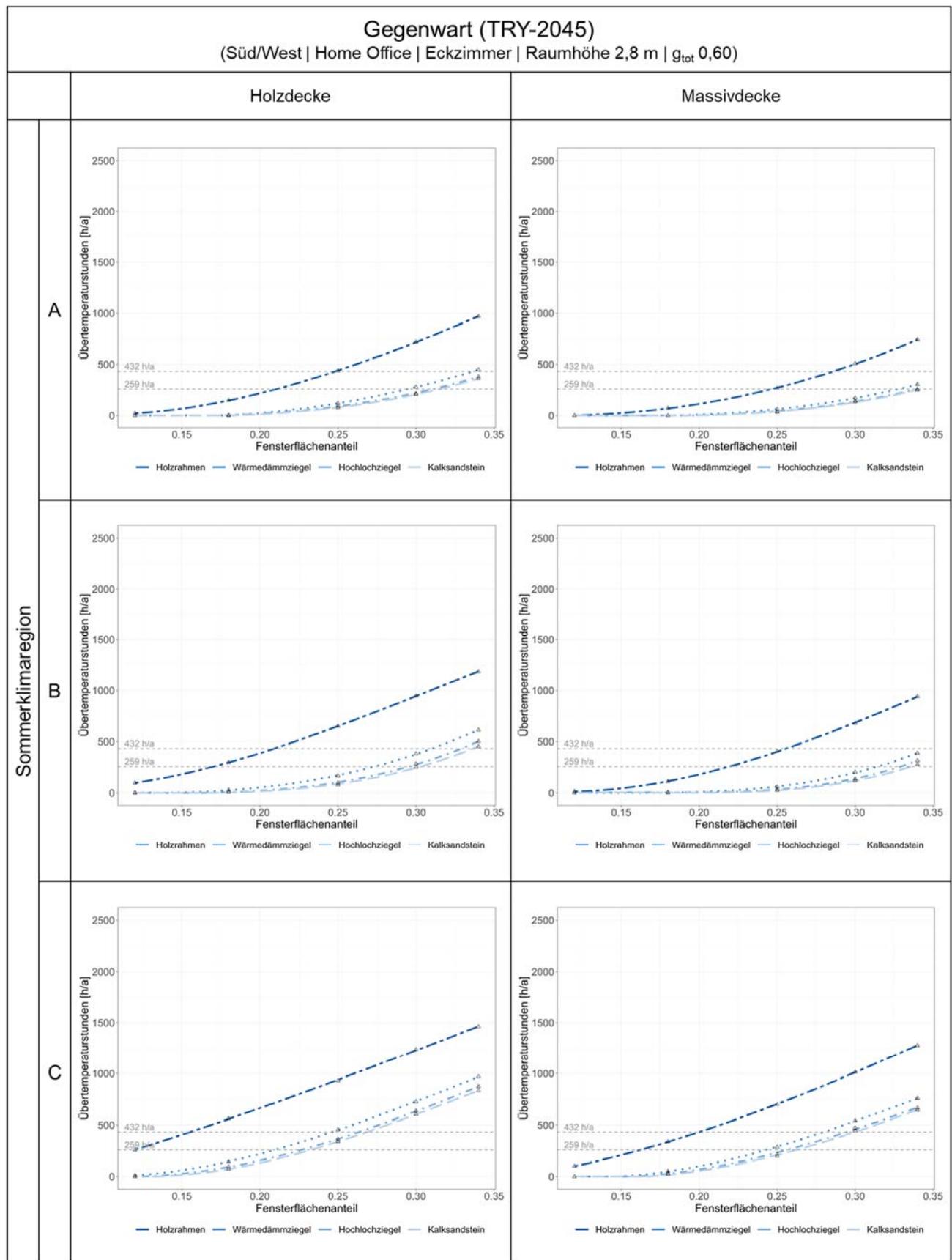


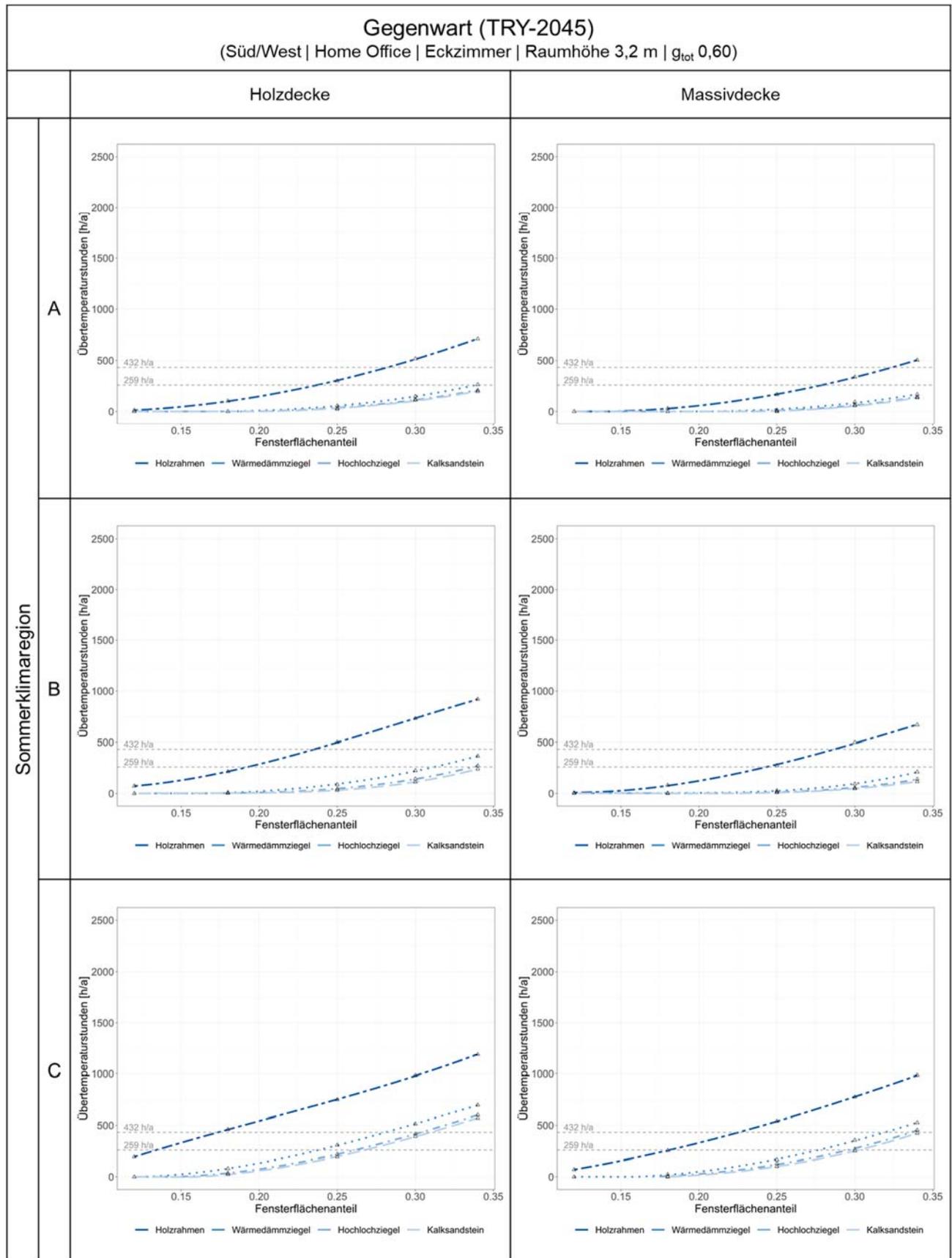


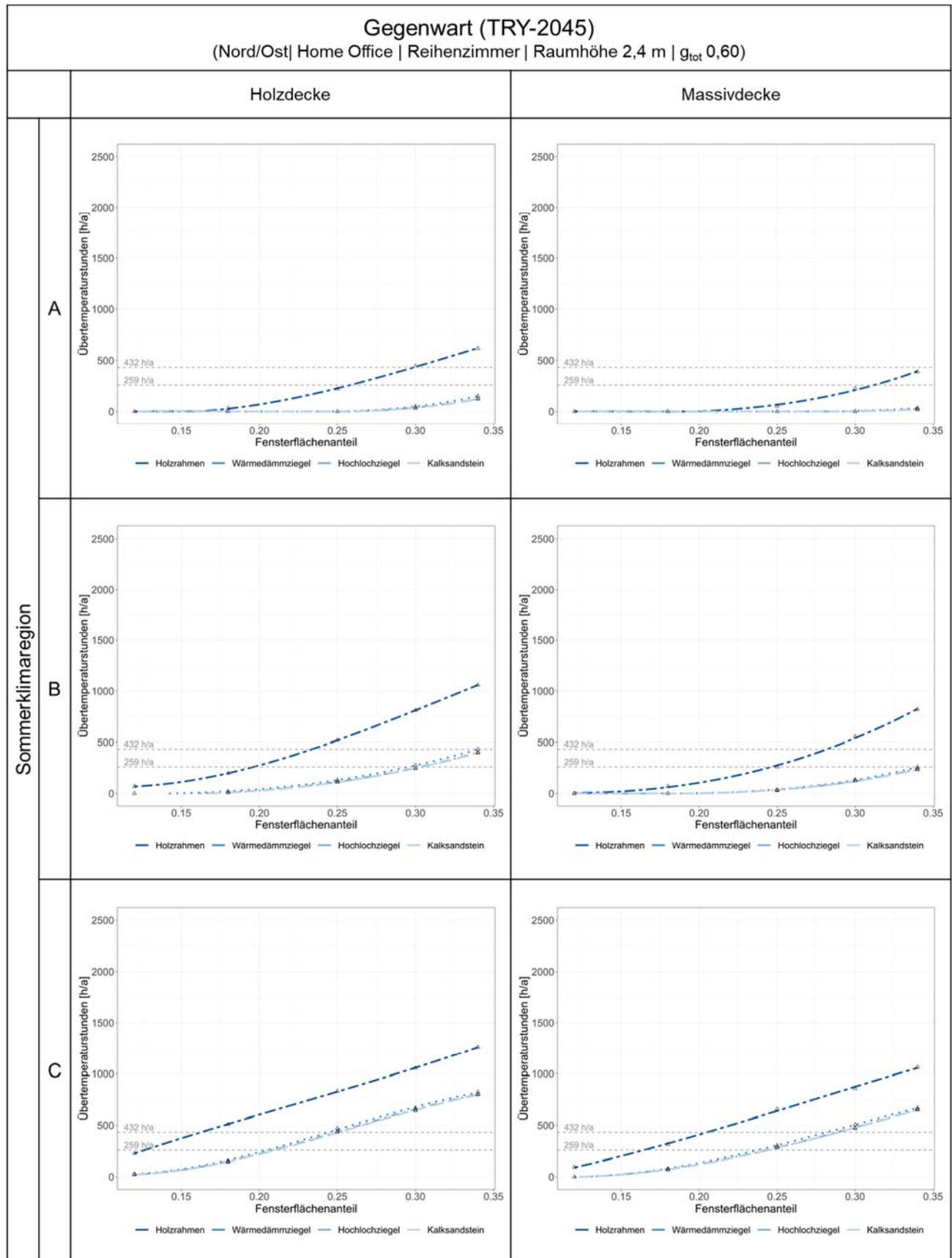


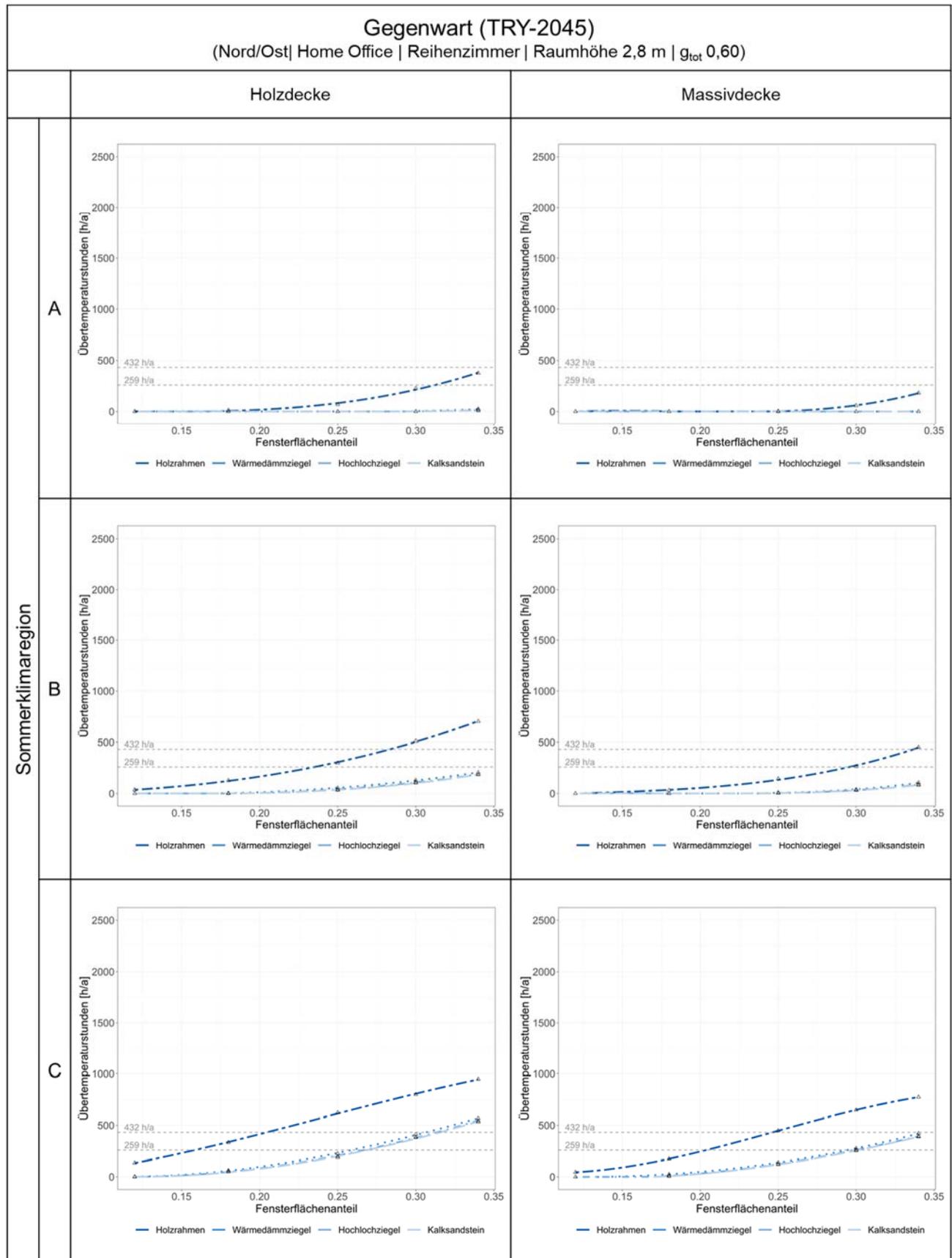


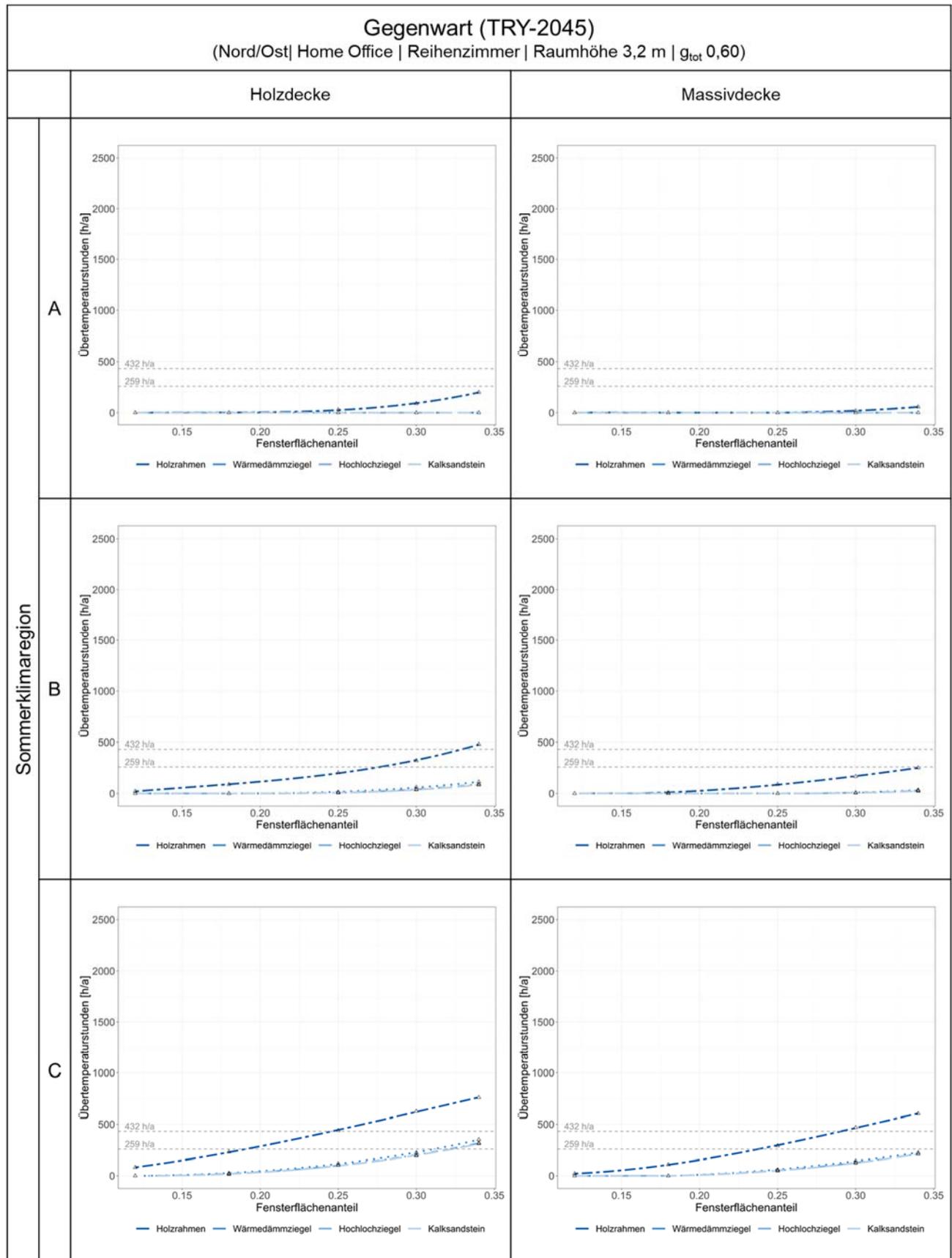








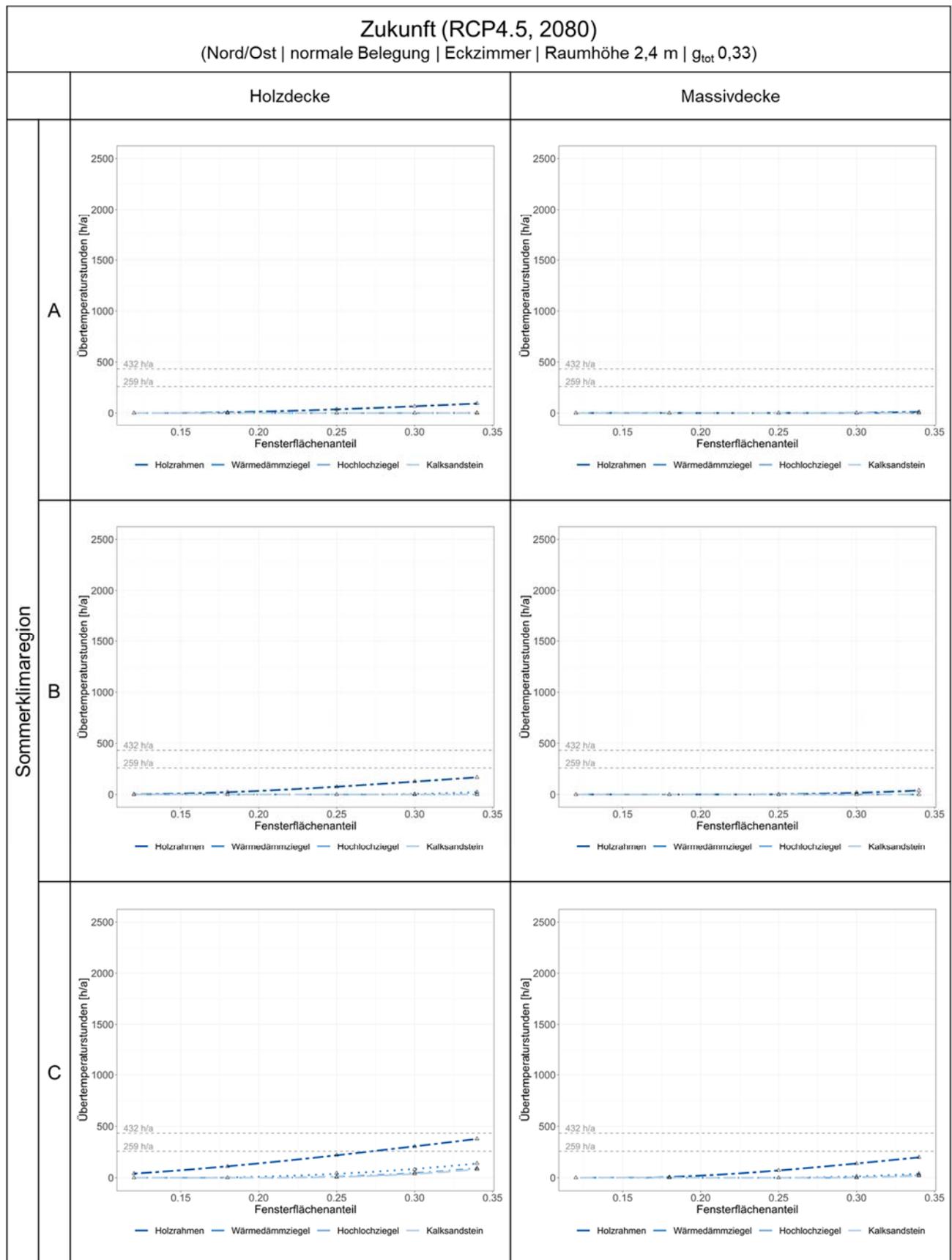


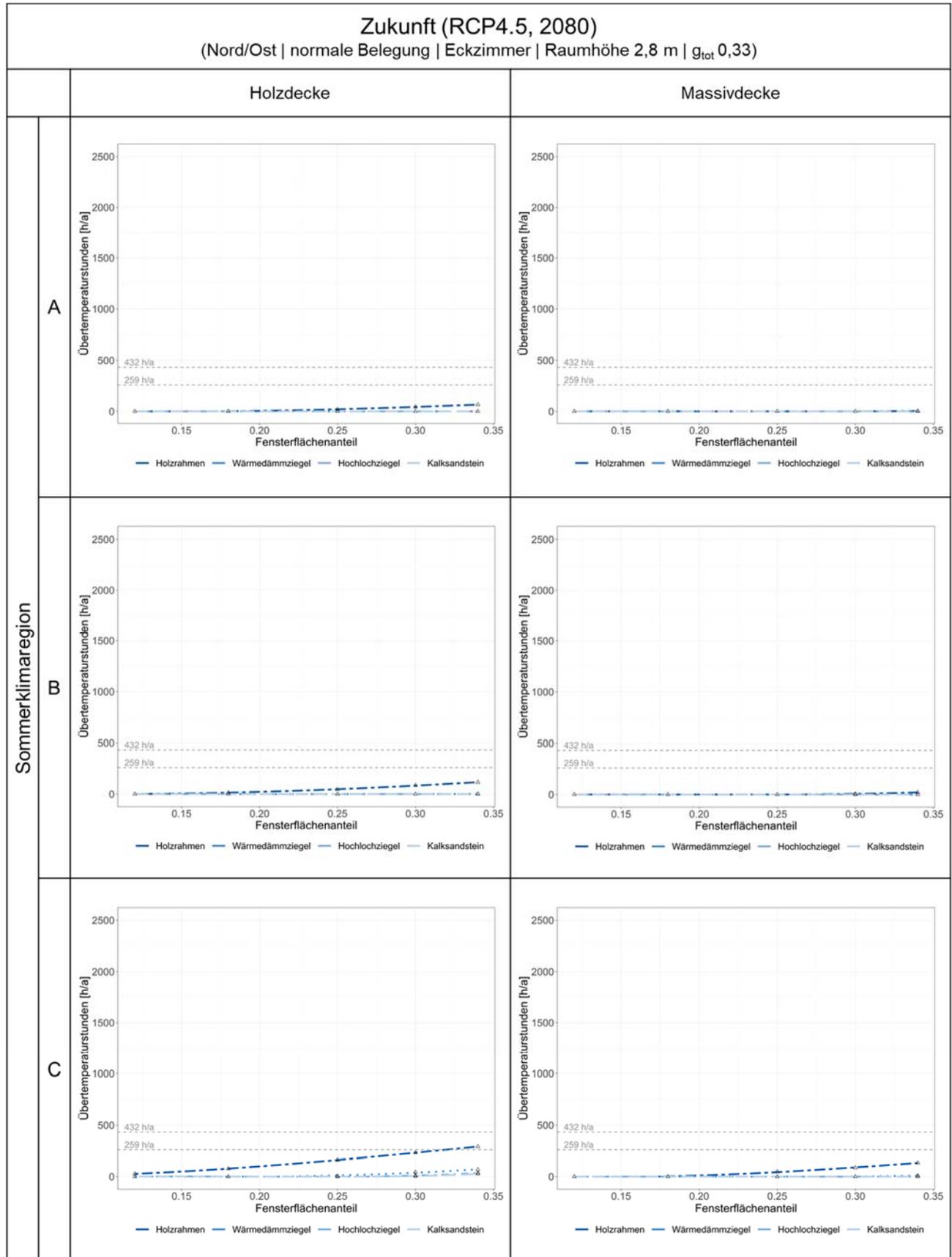


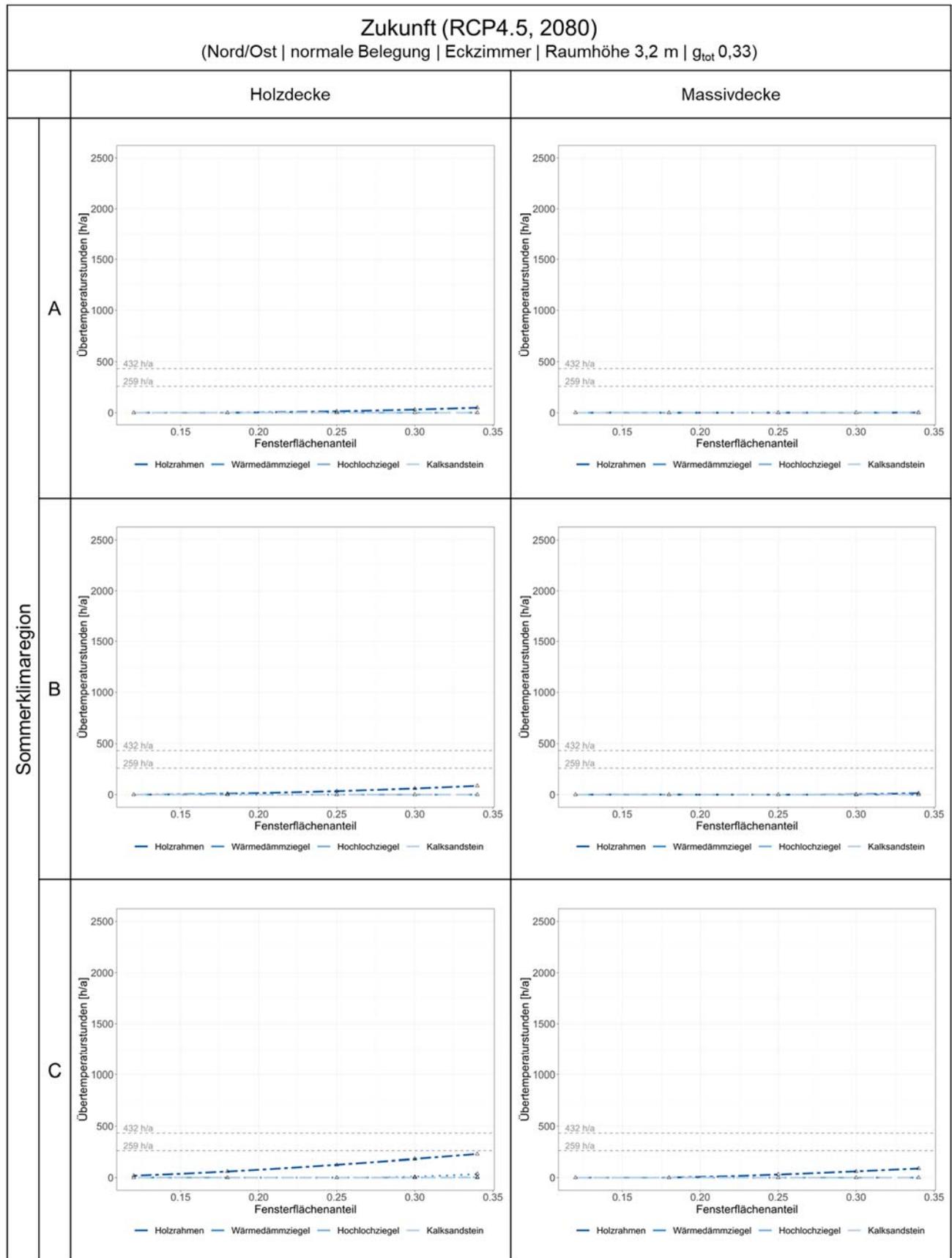
Endbericht für das Forschungsvorhaben:

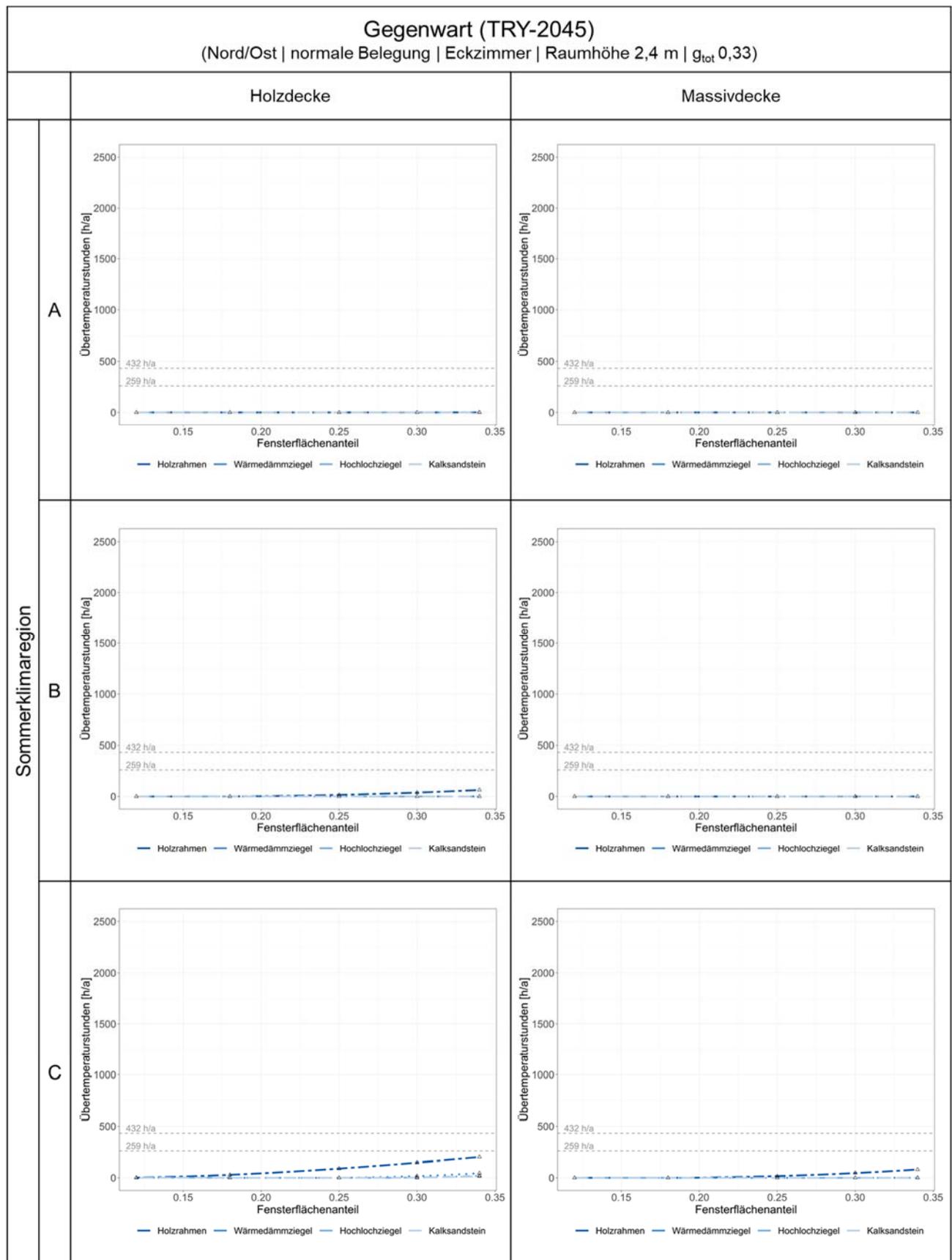
Zukunft von Bauweisen mit höheren Dichten

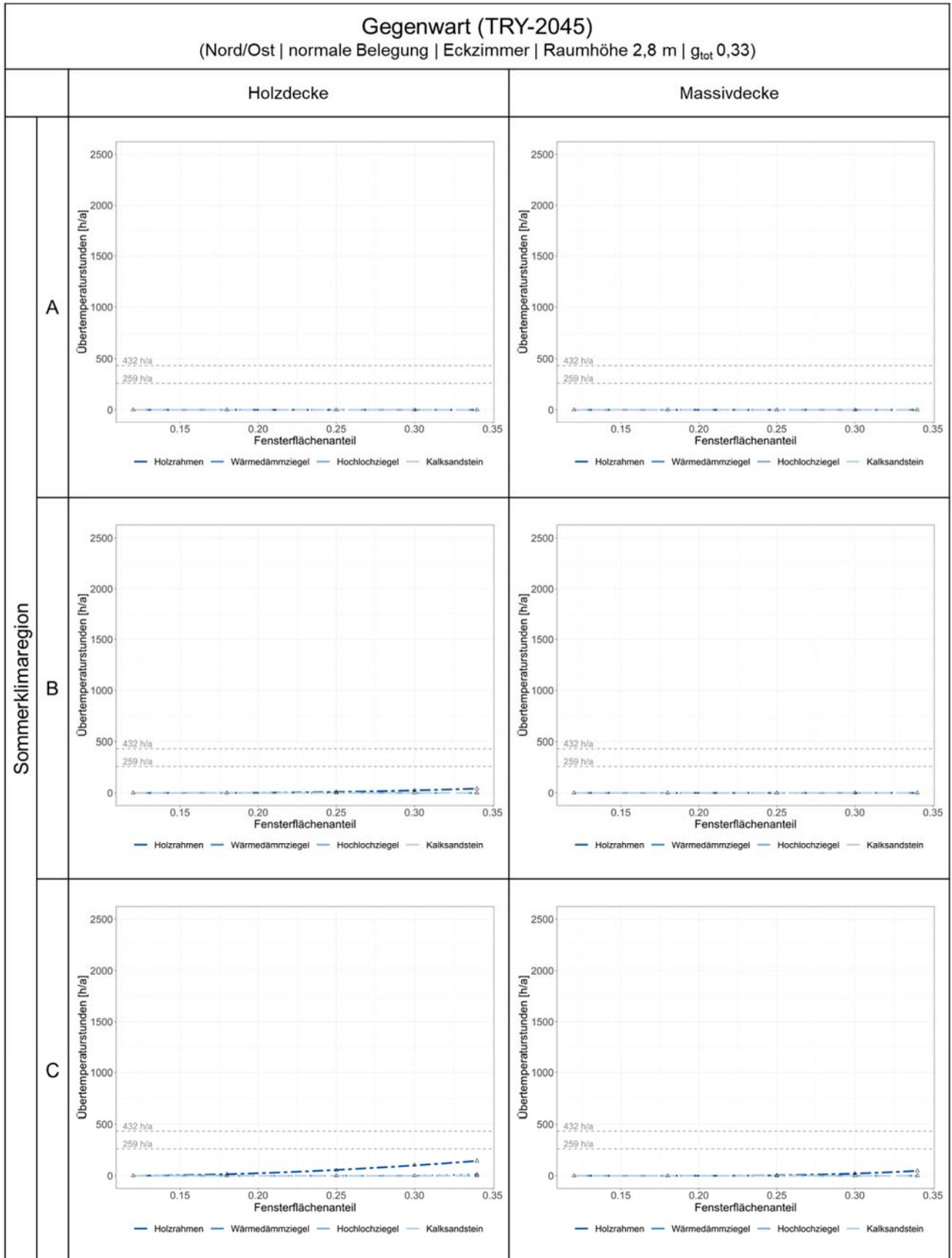
Anhang B

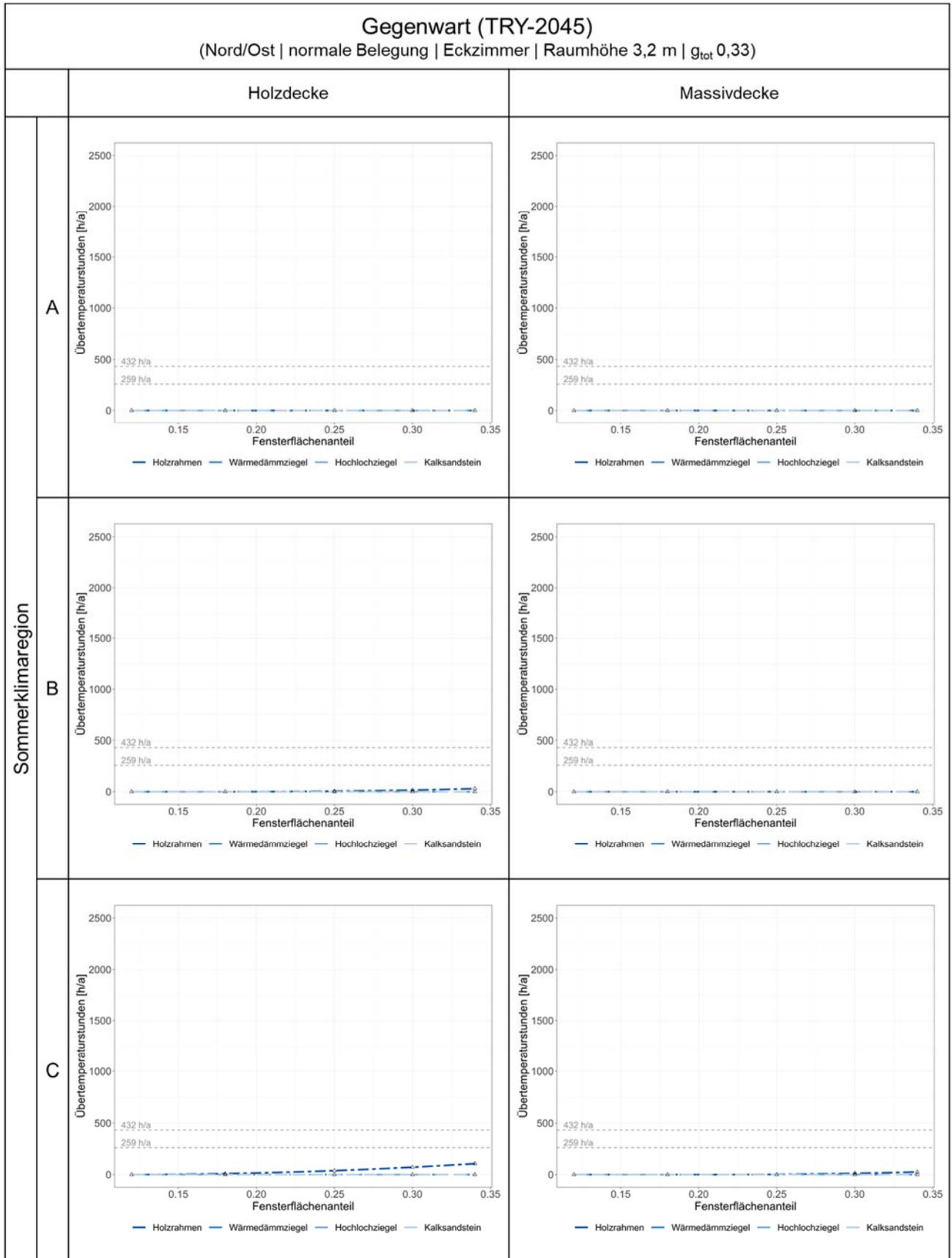


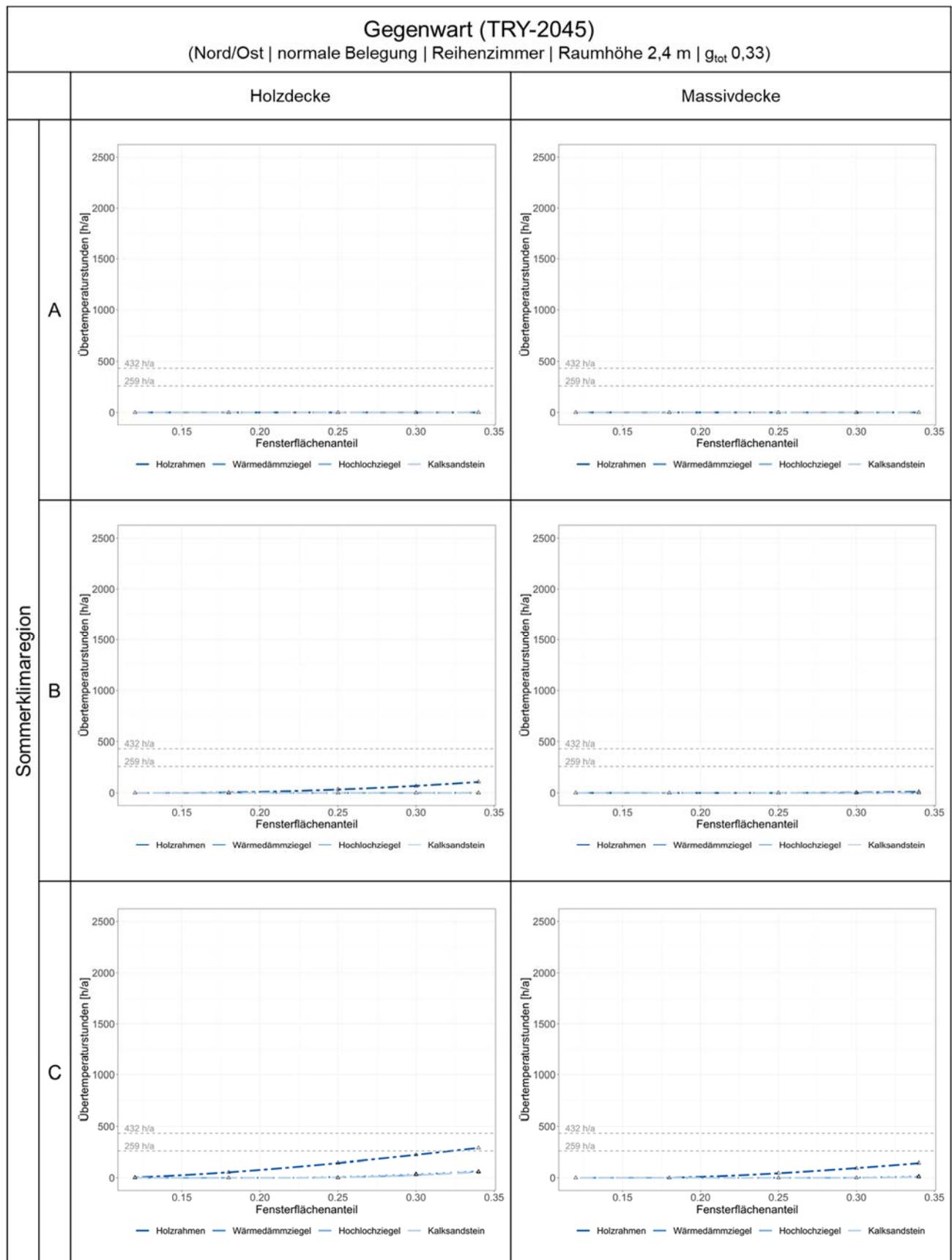


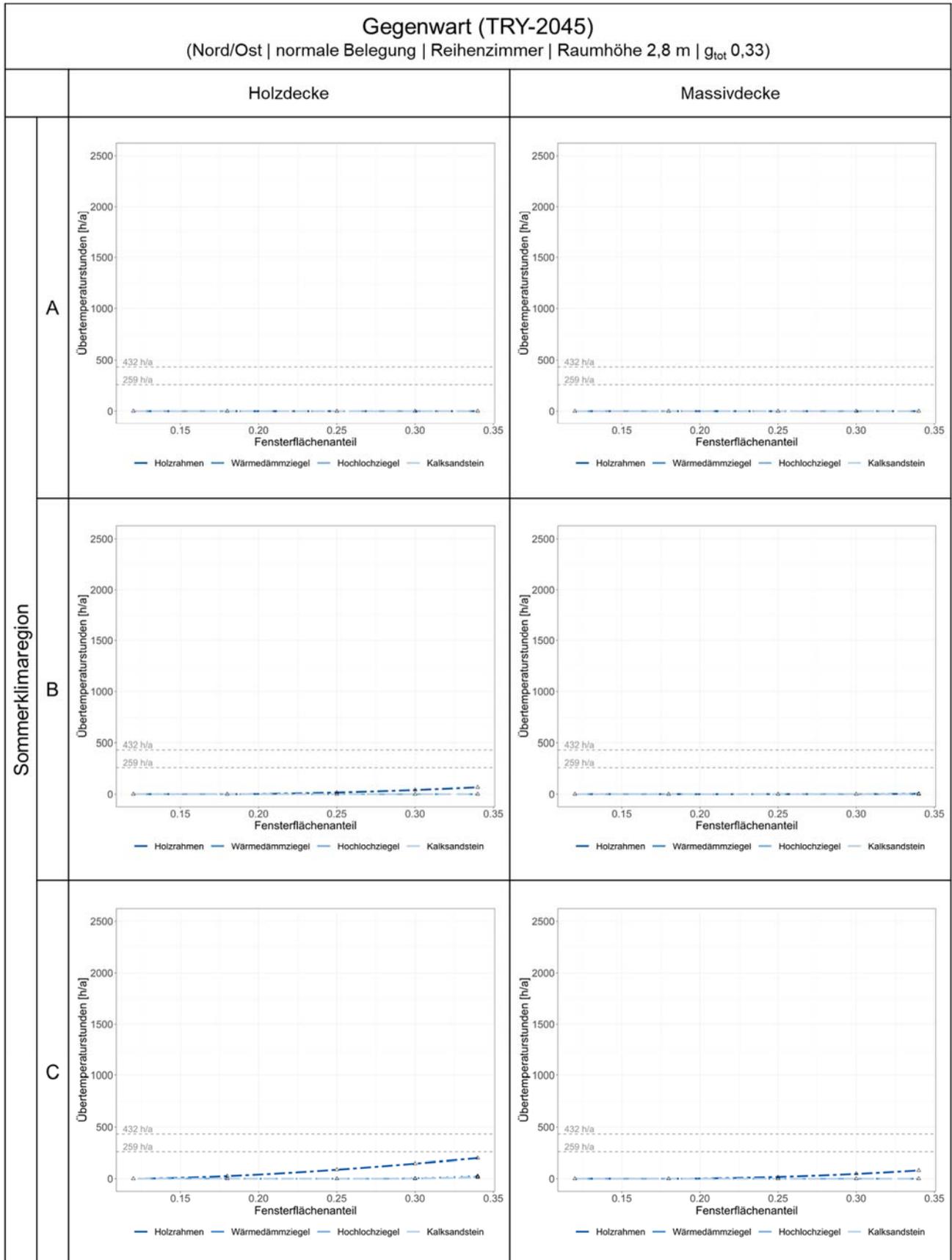


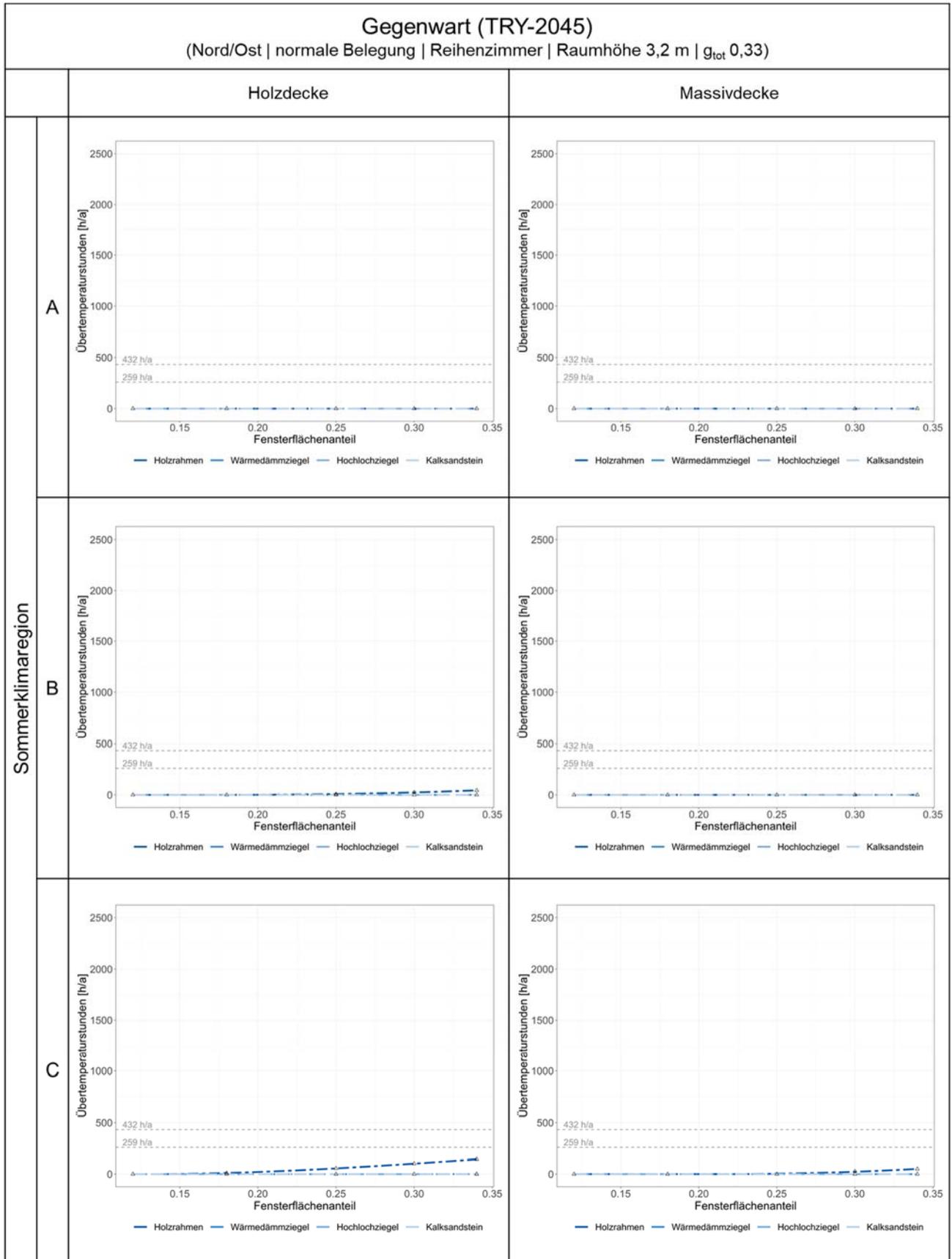


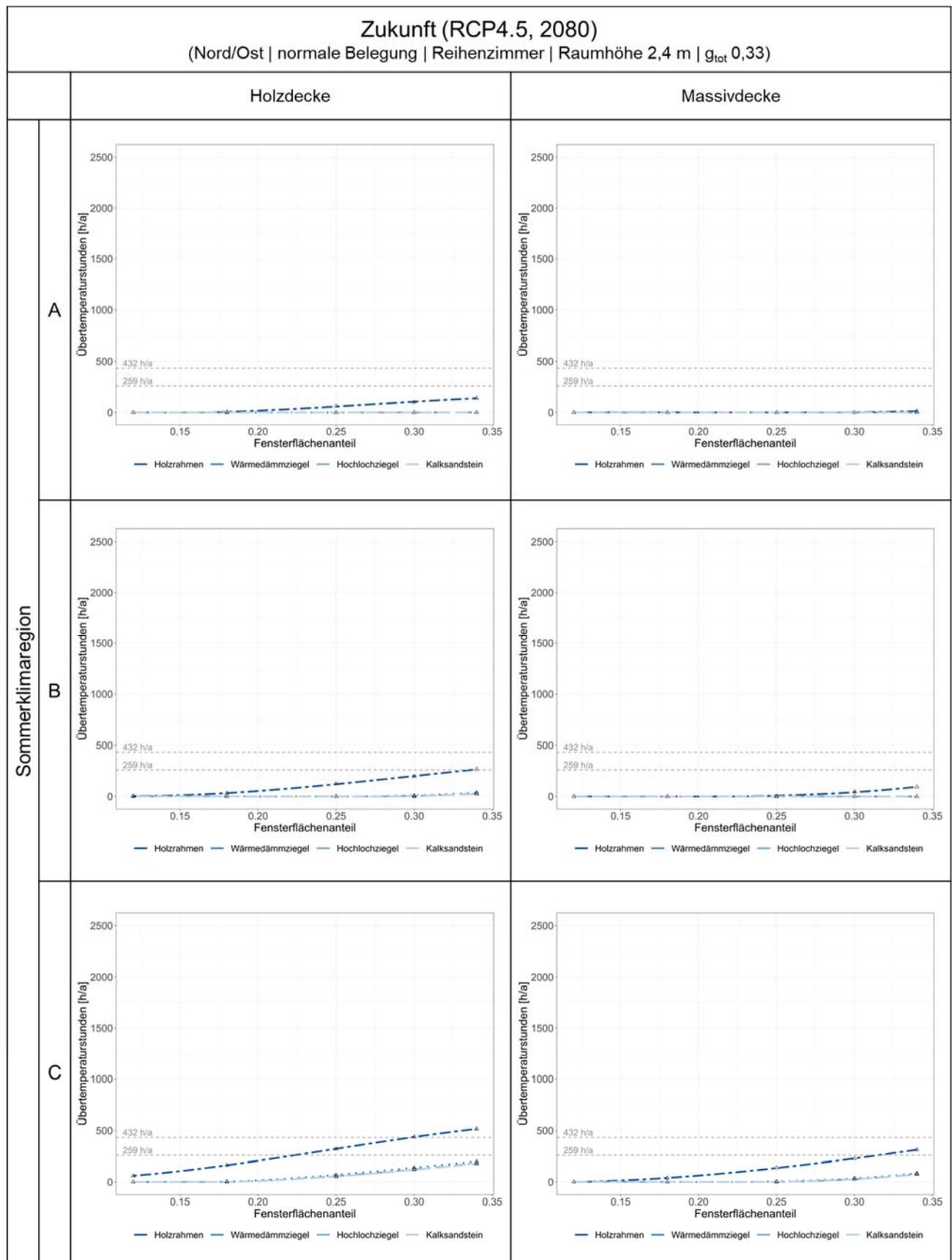


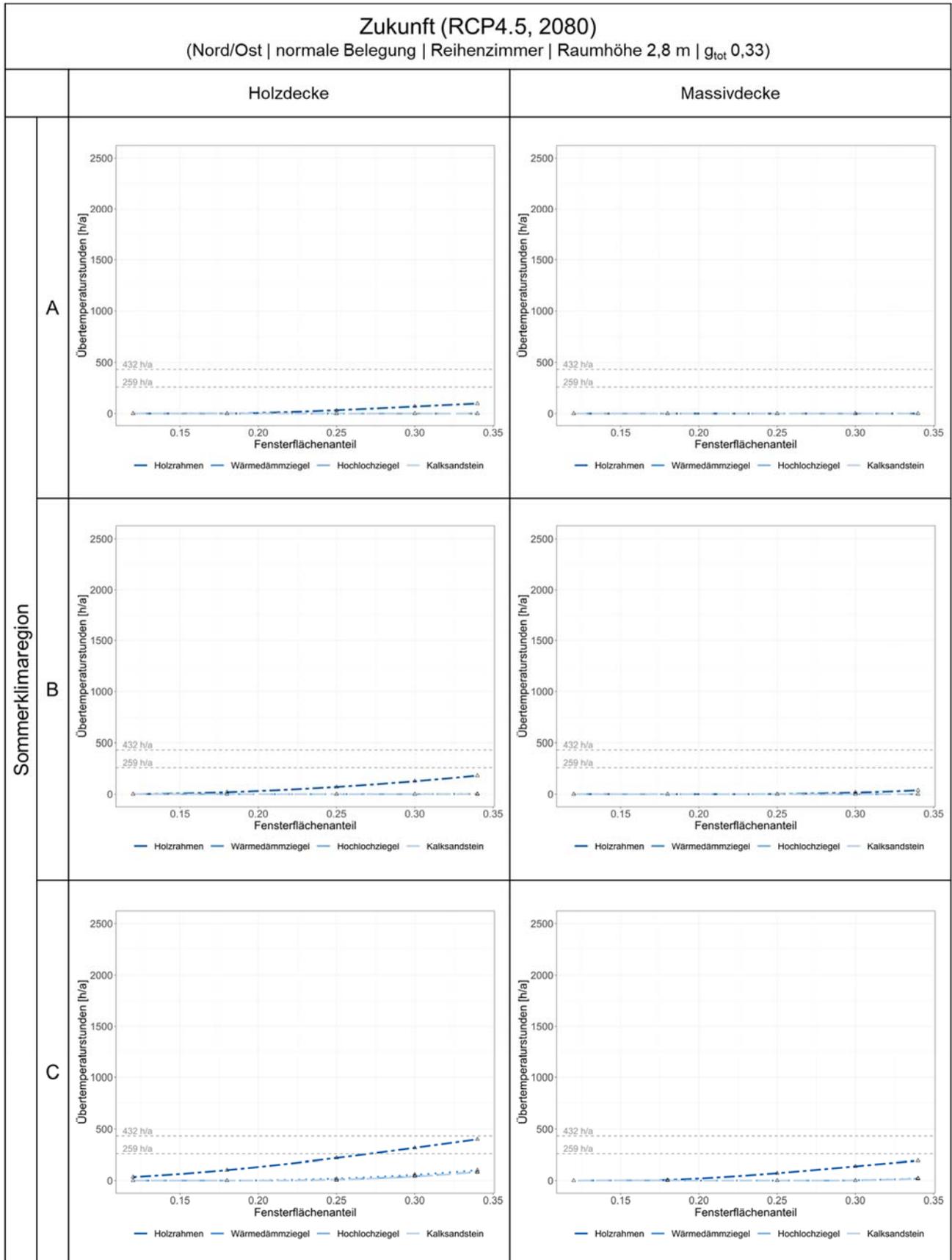


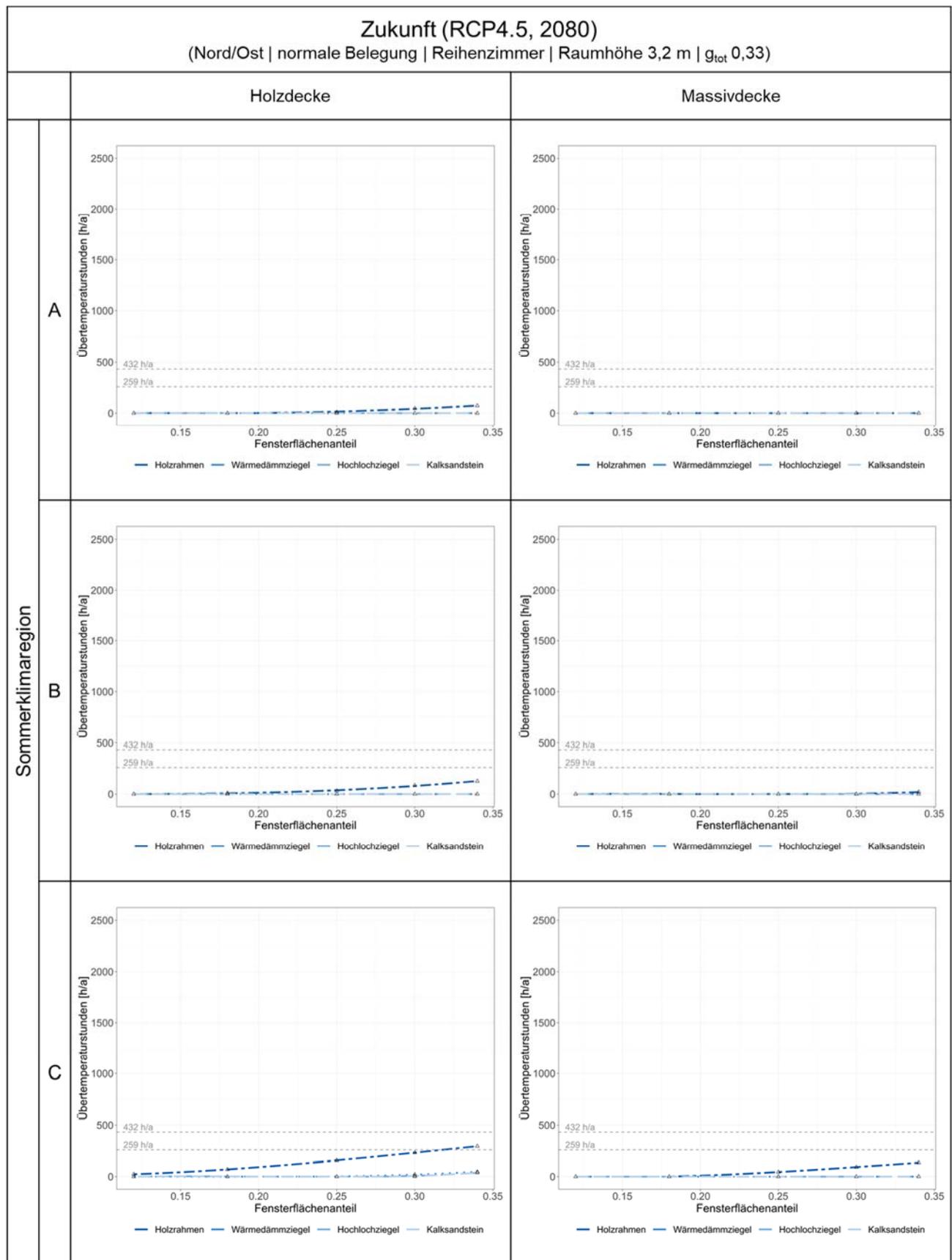


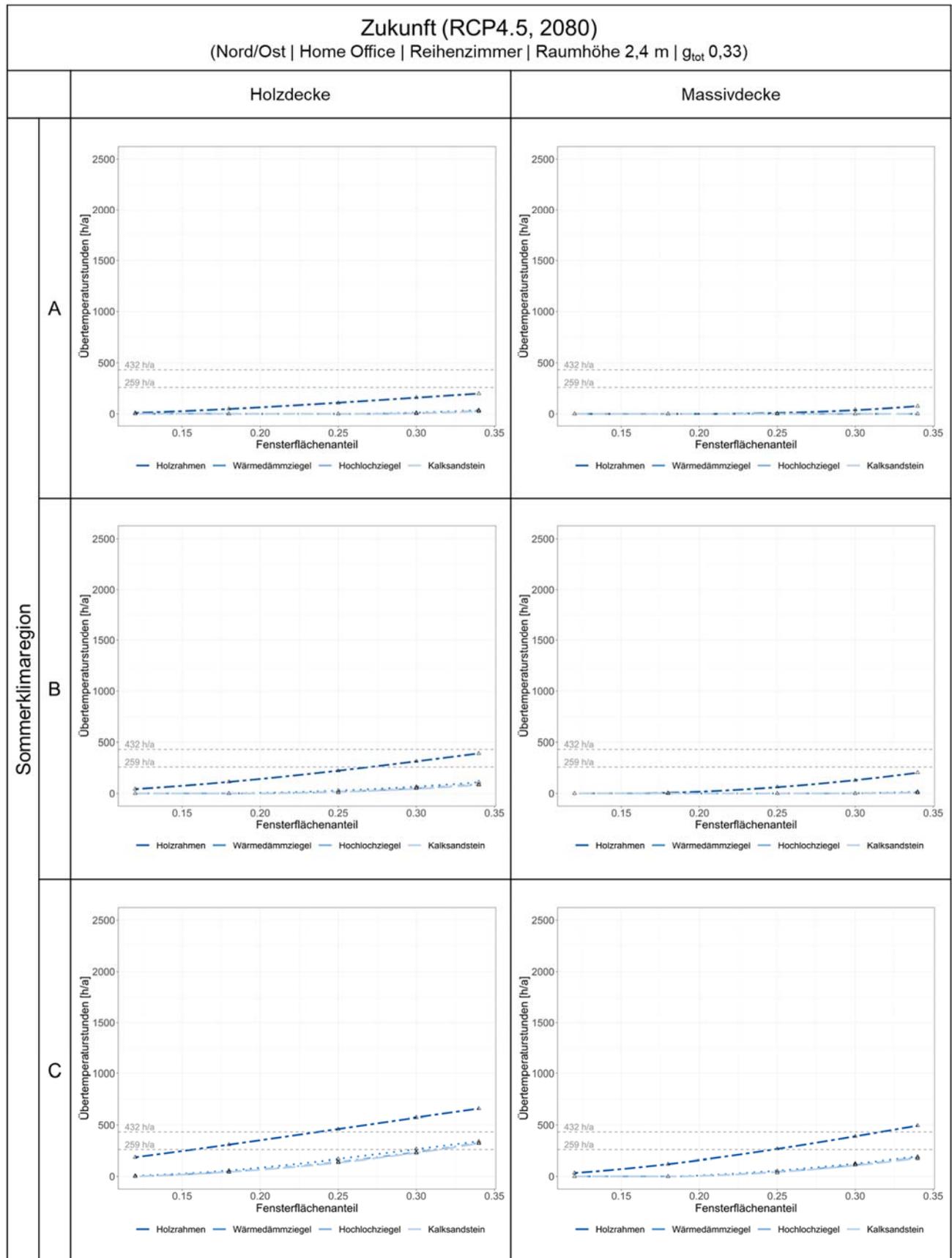


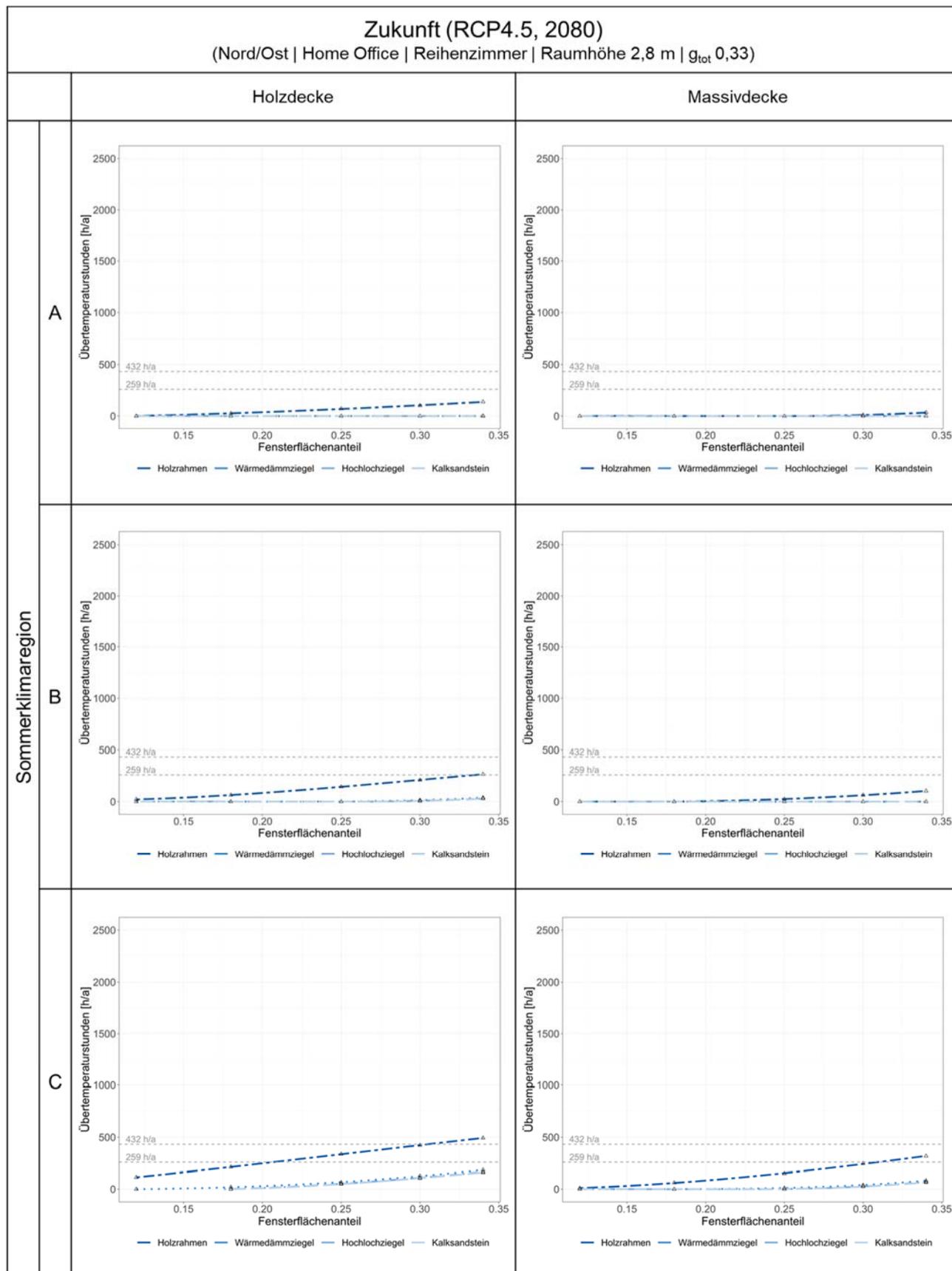


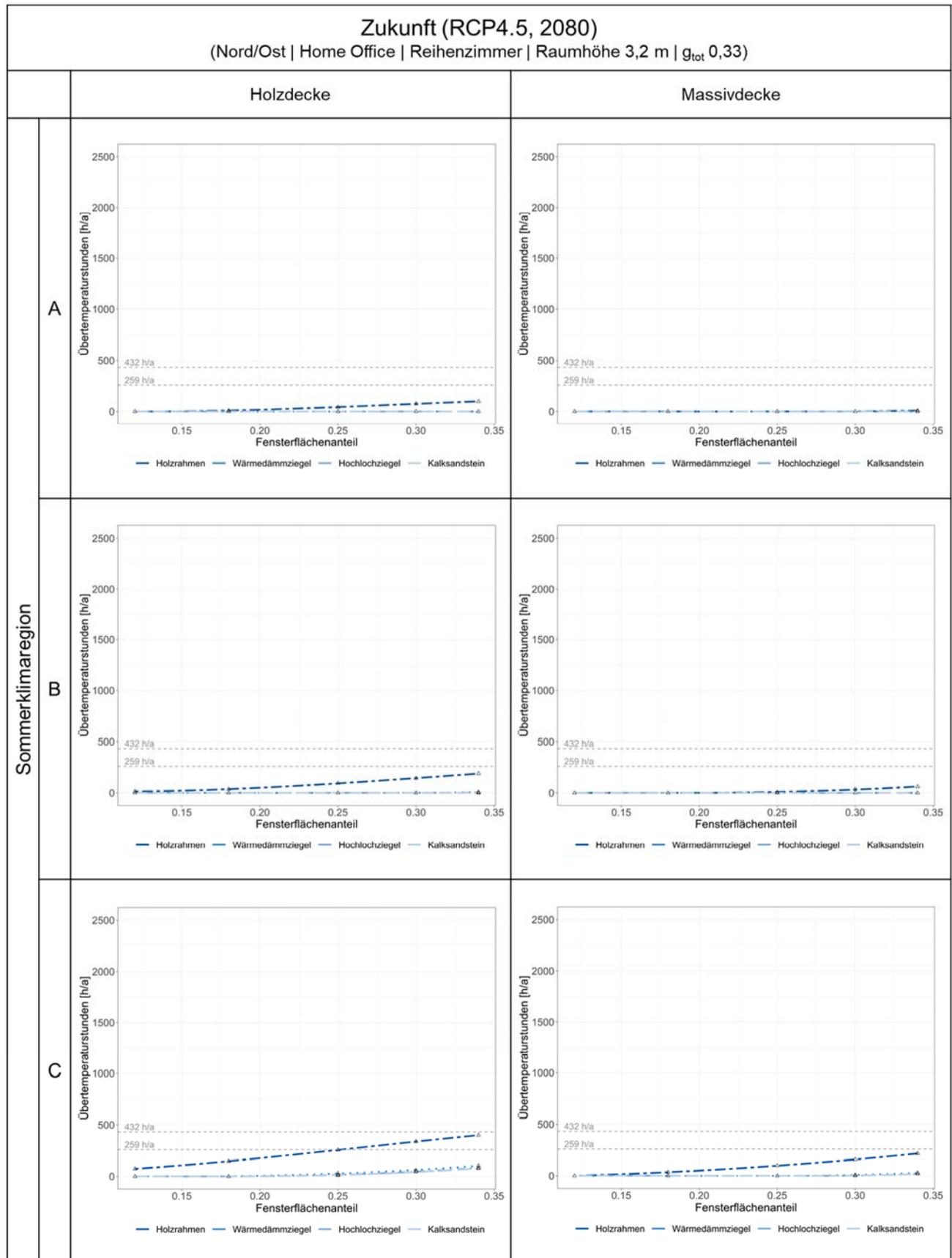


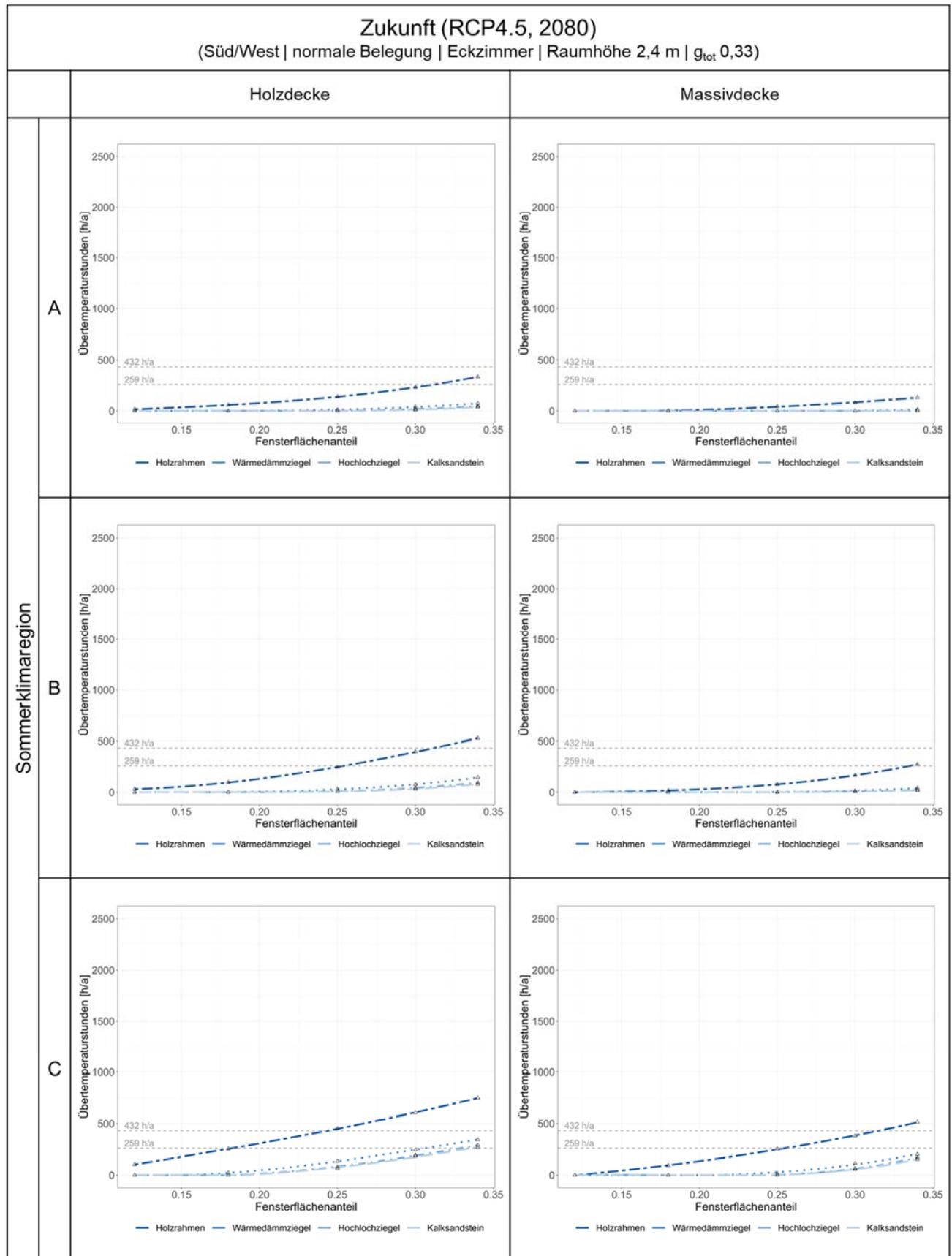


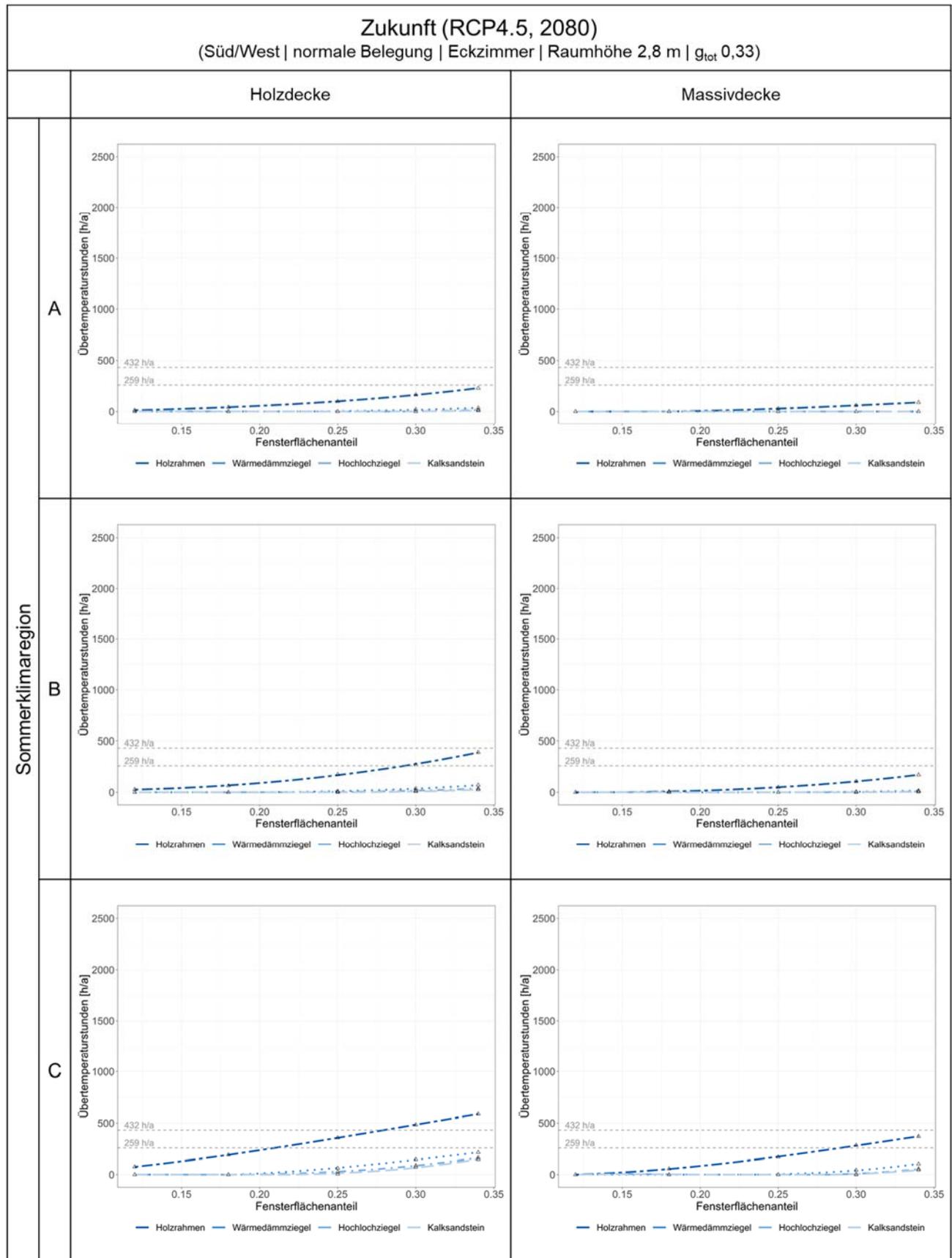


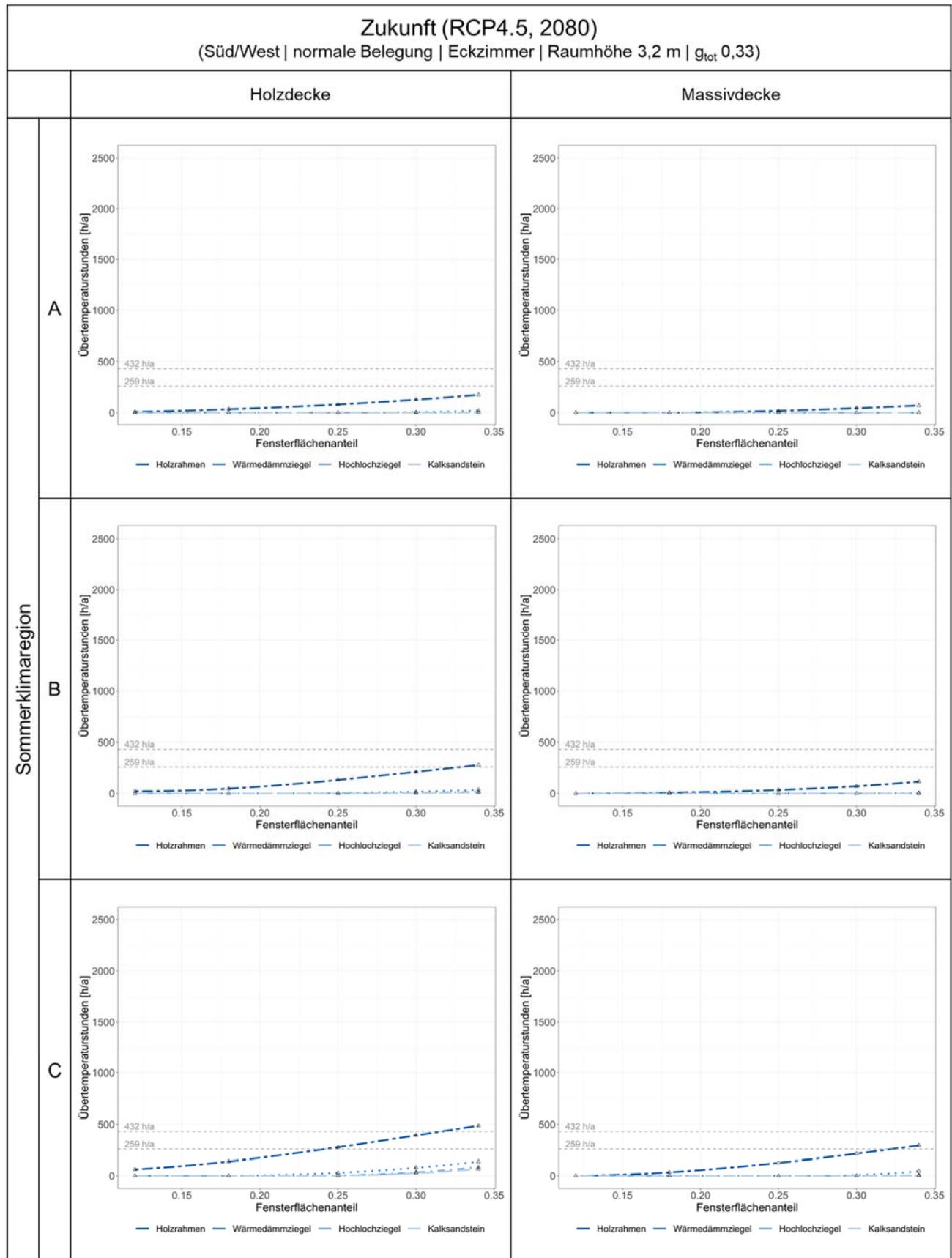


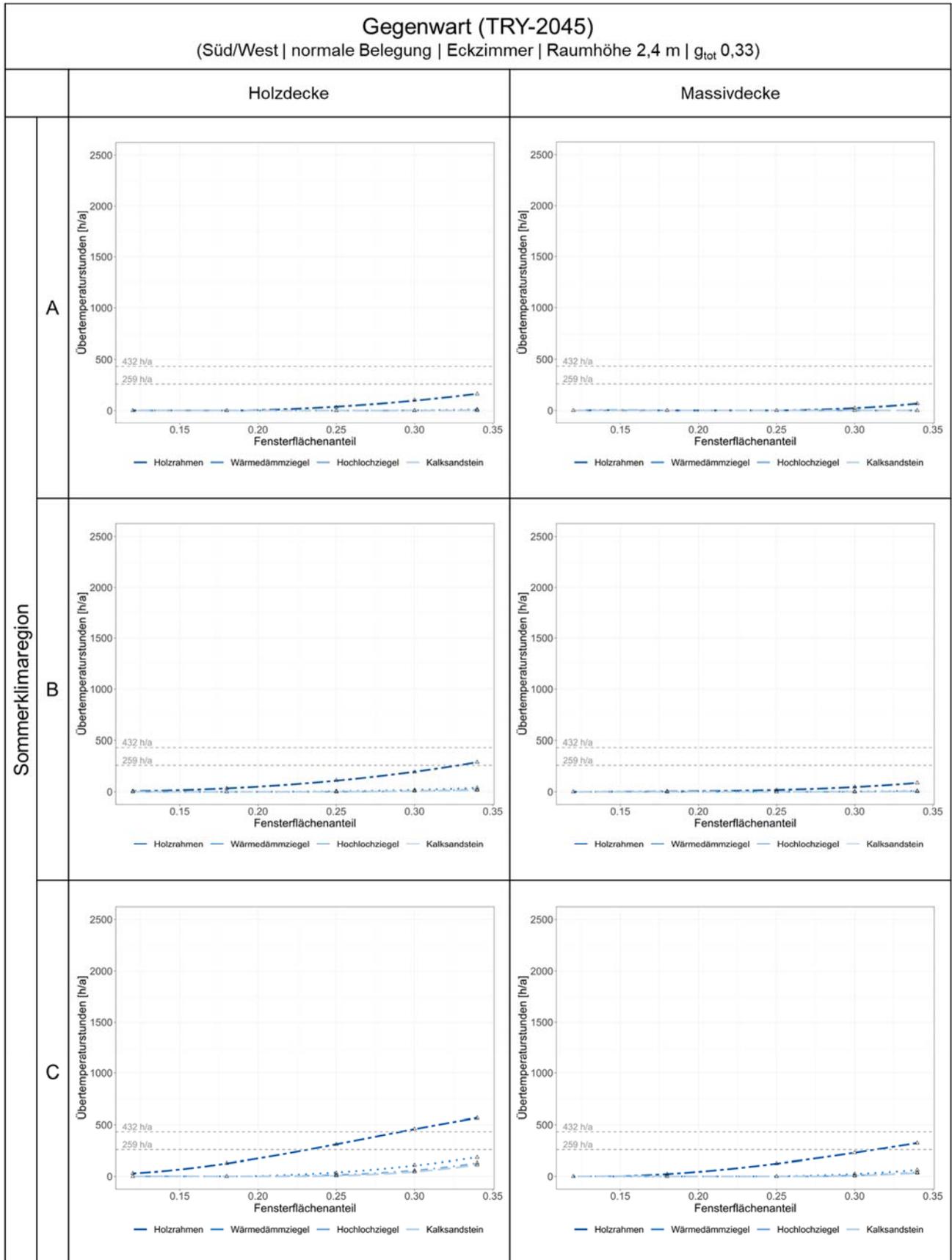


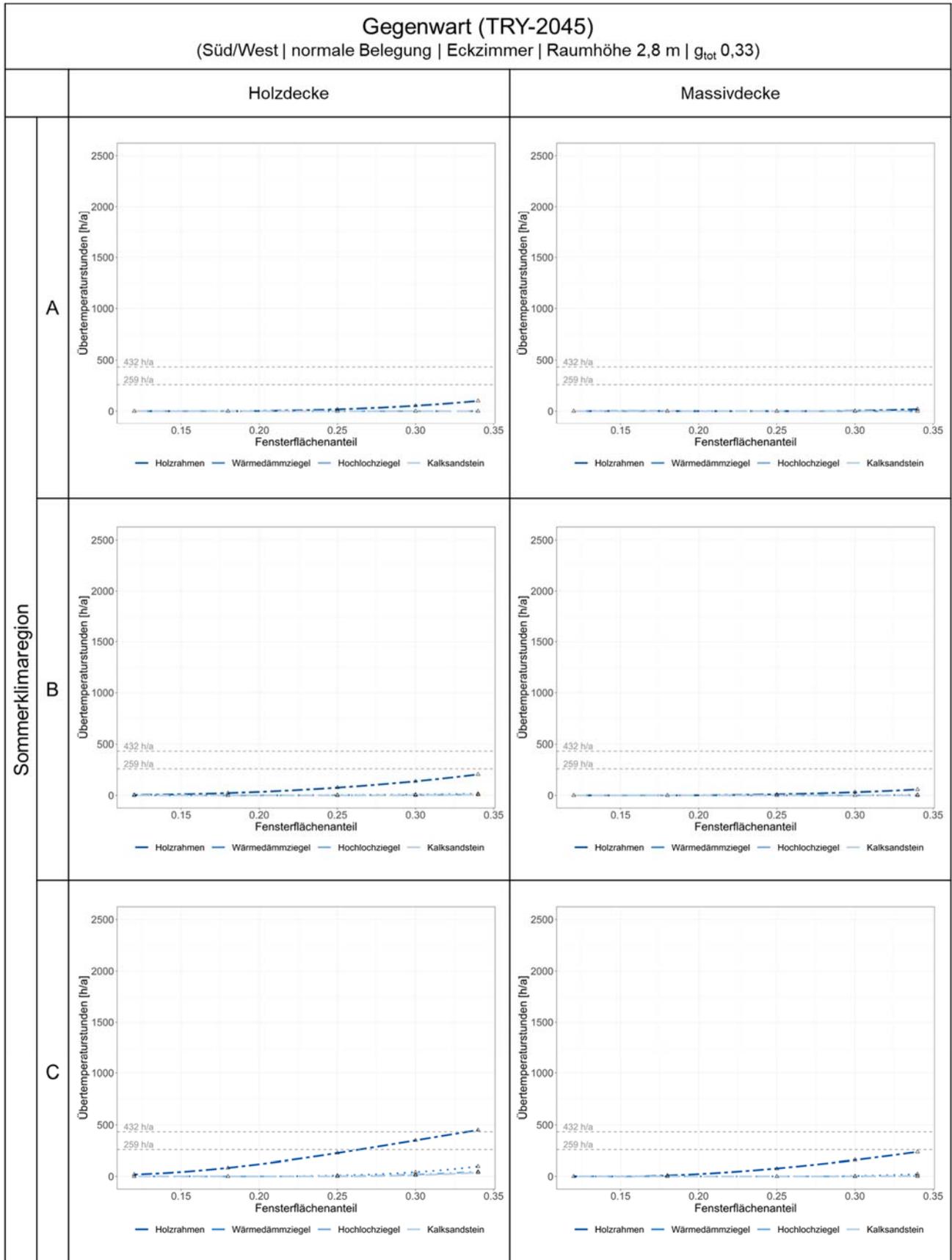


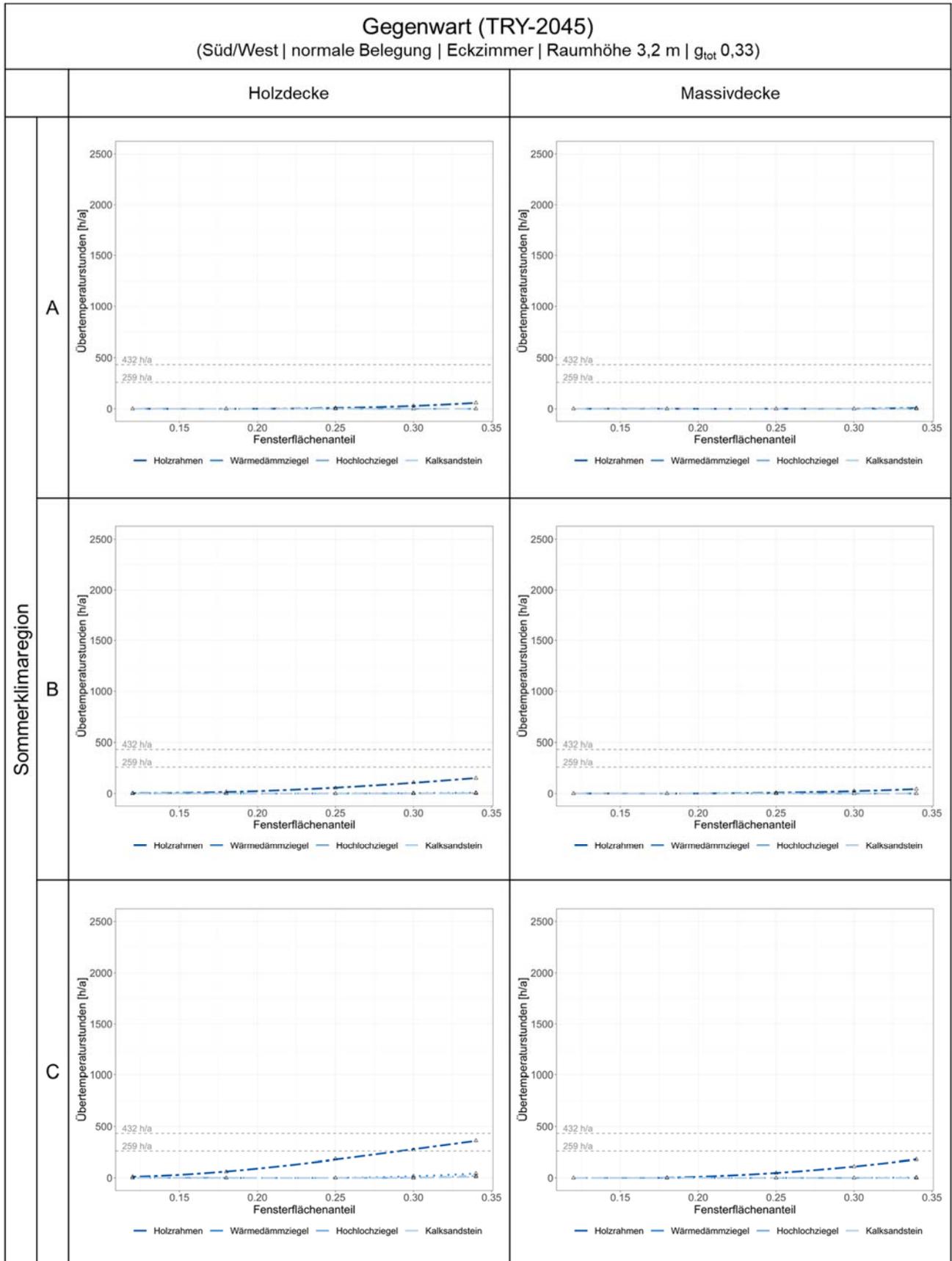


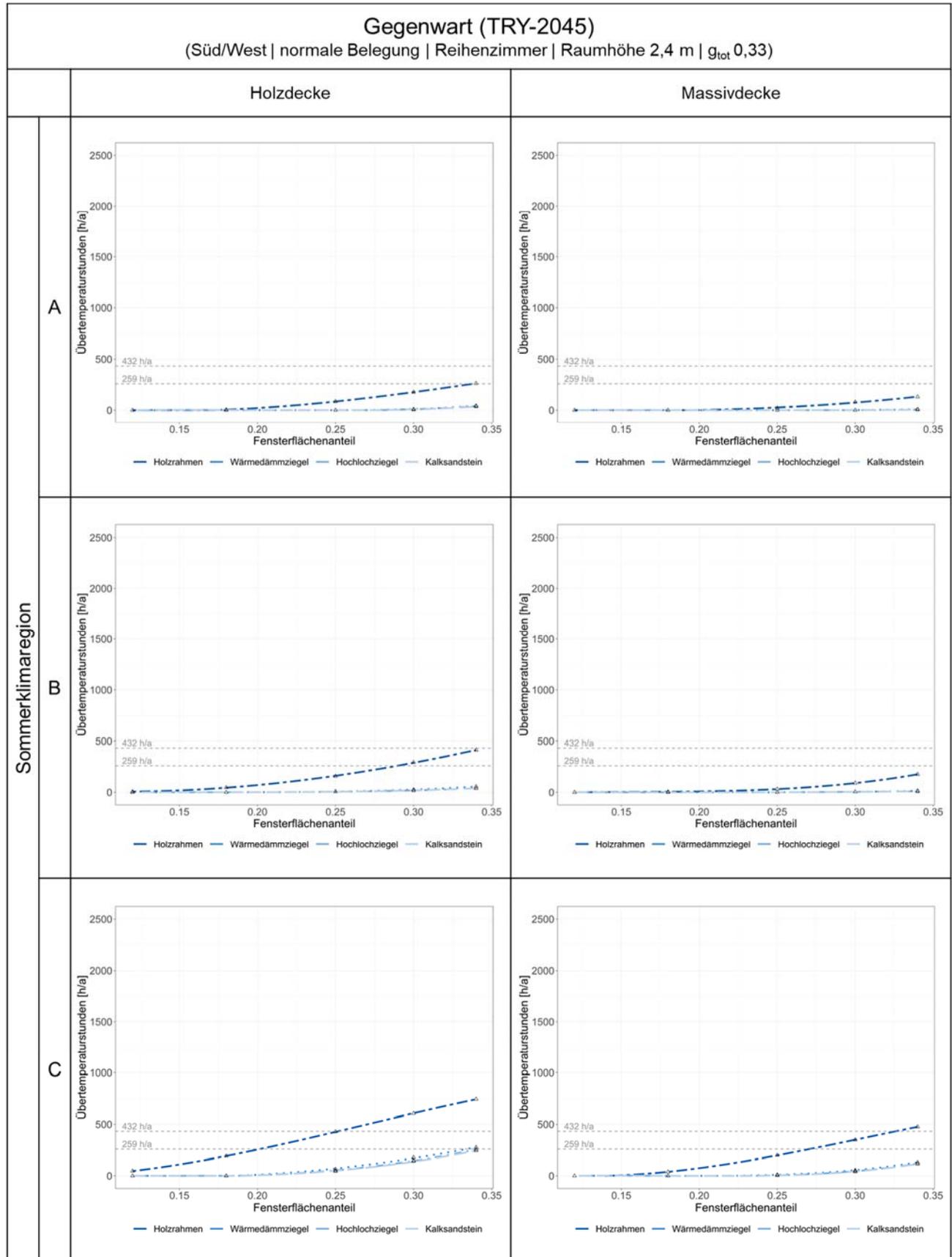


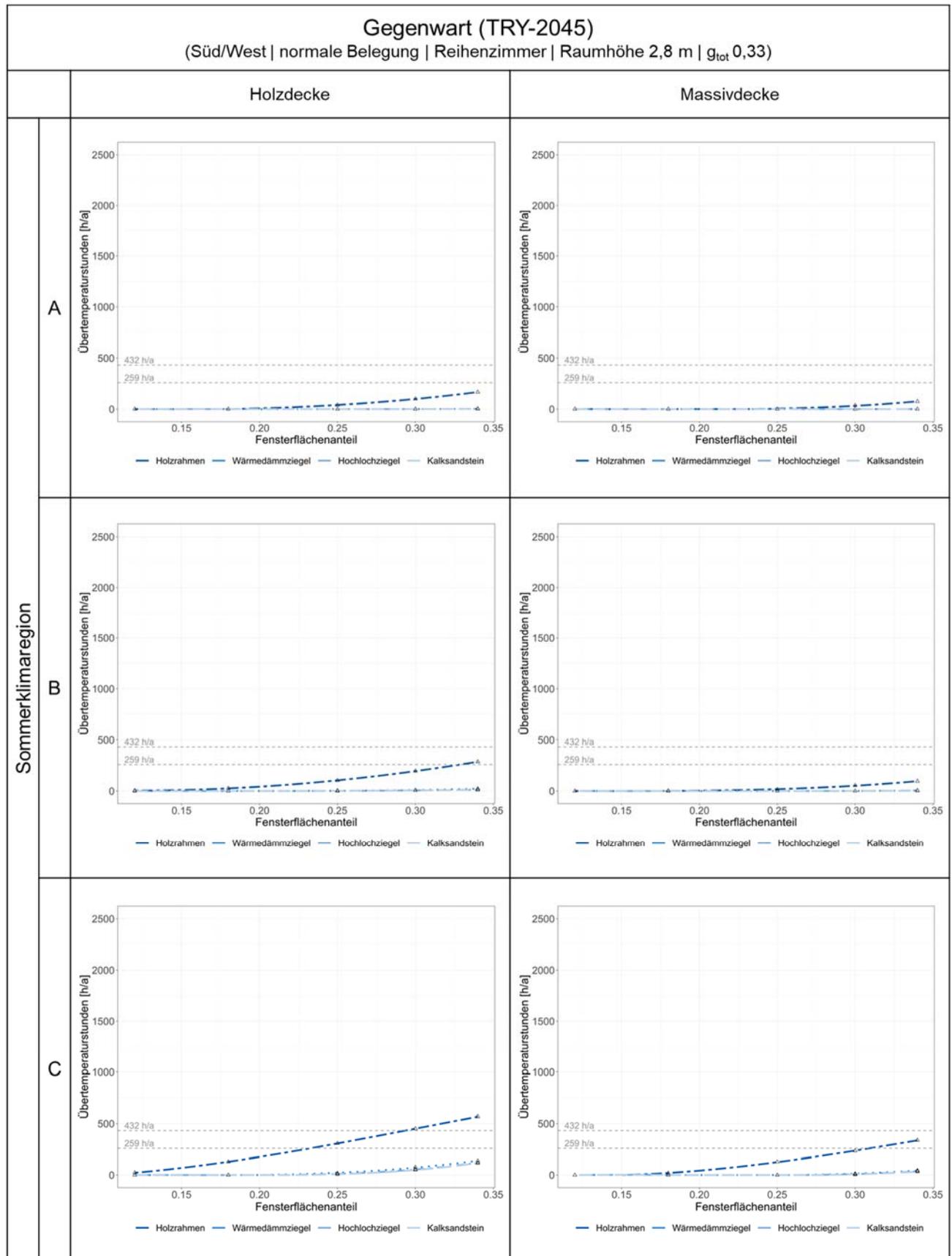


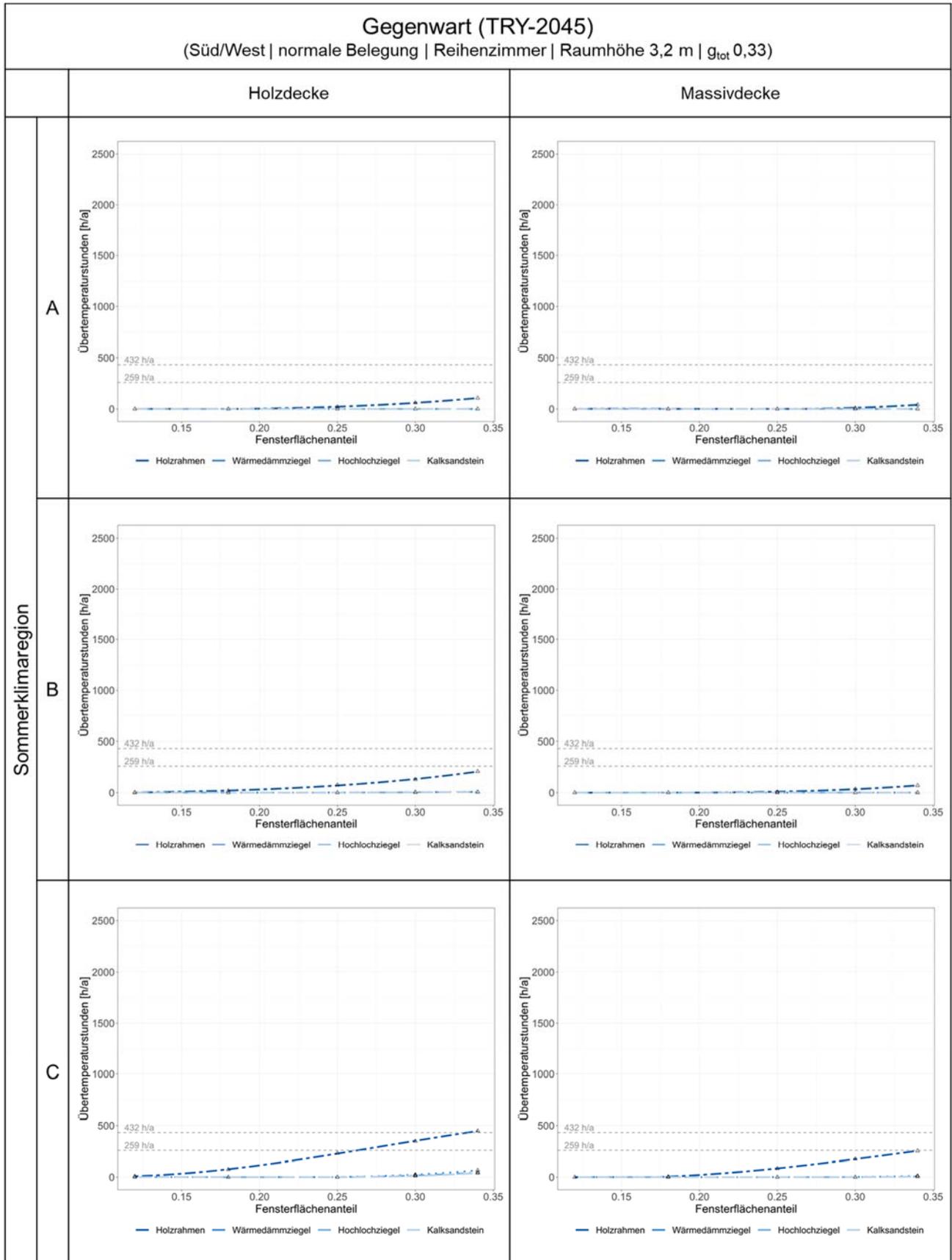


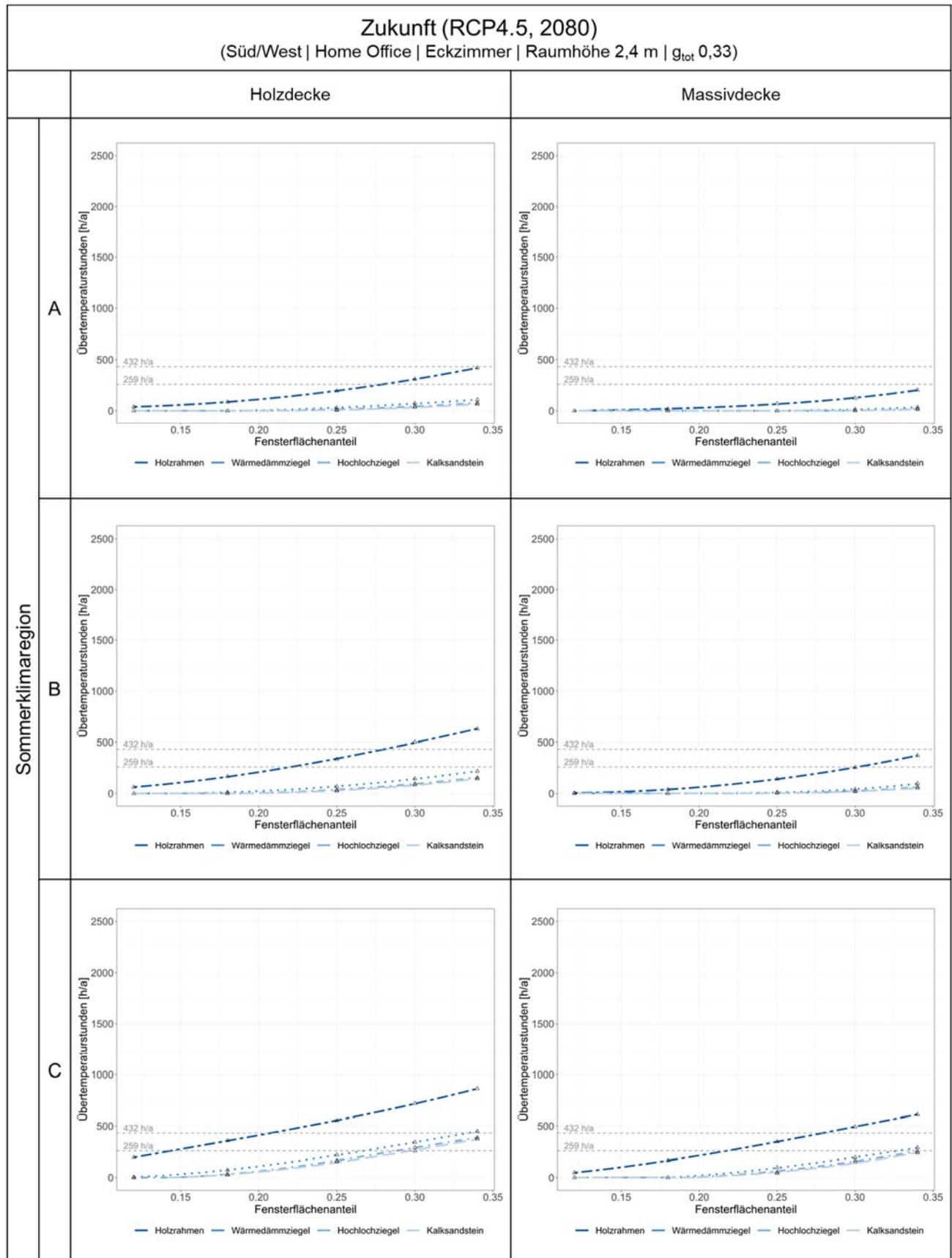


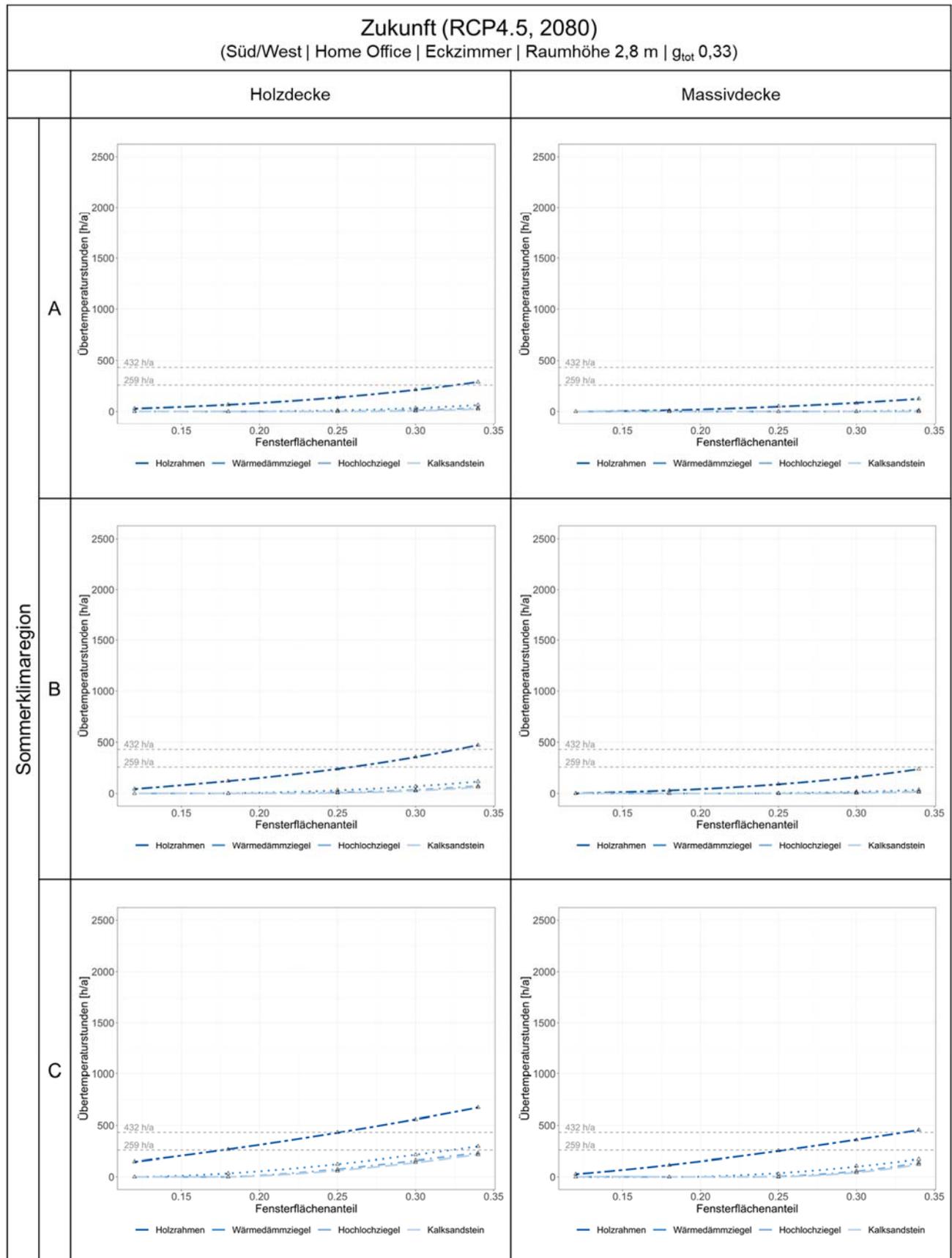


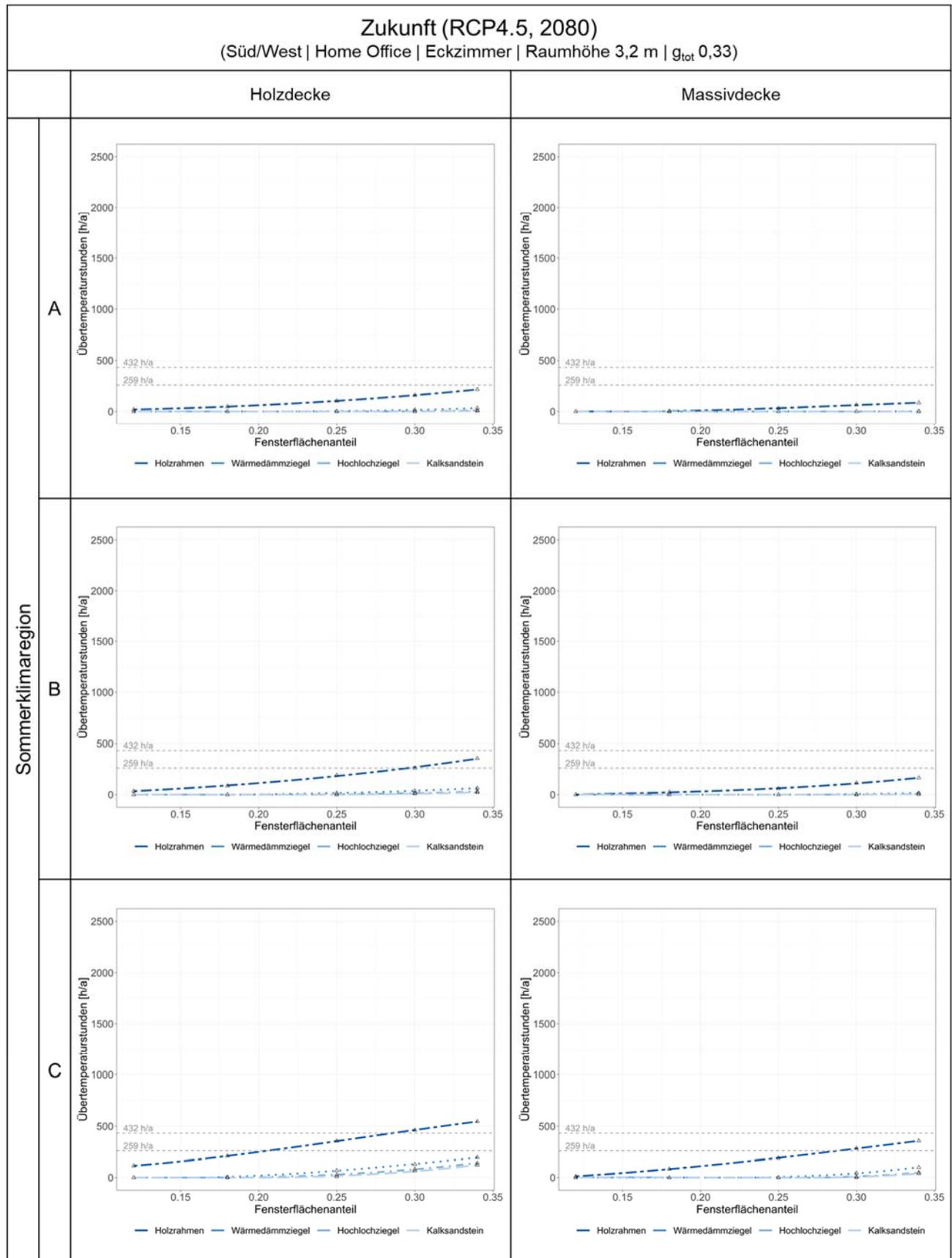


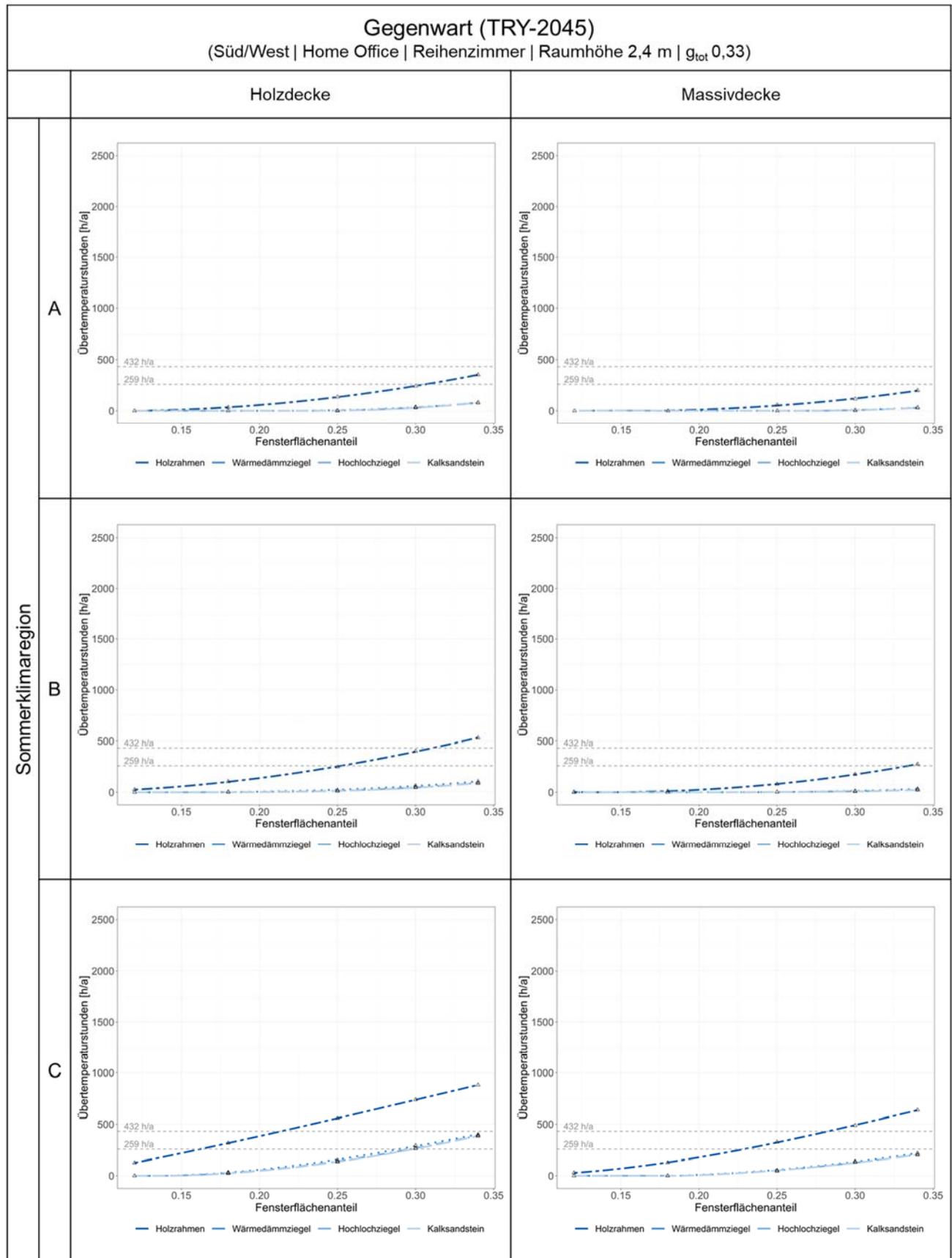


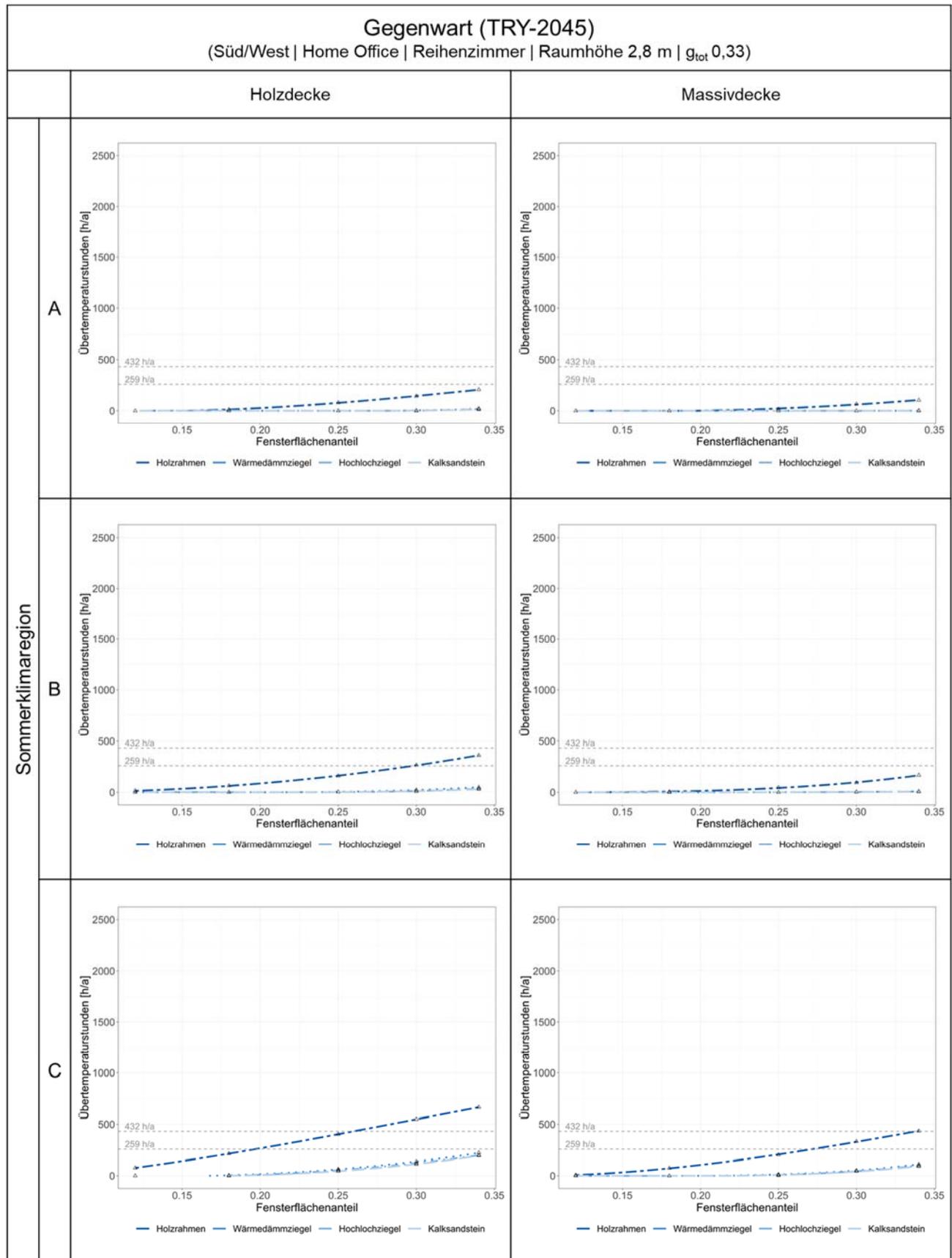


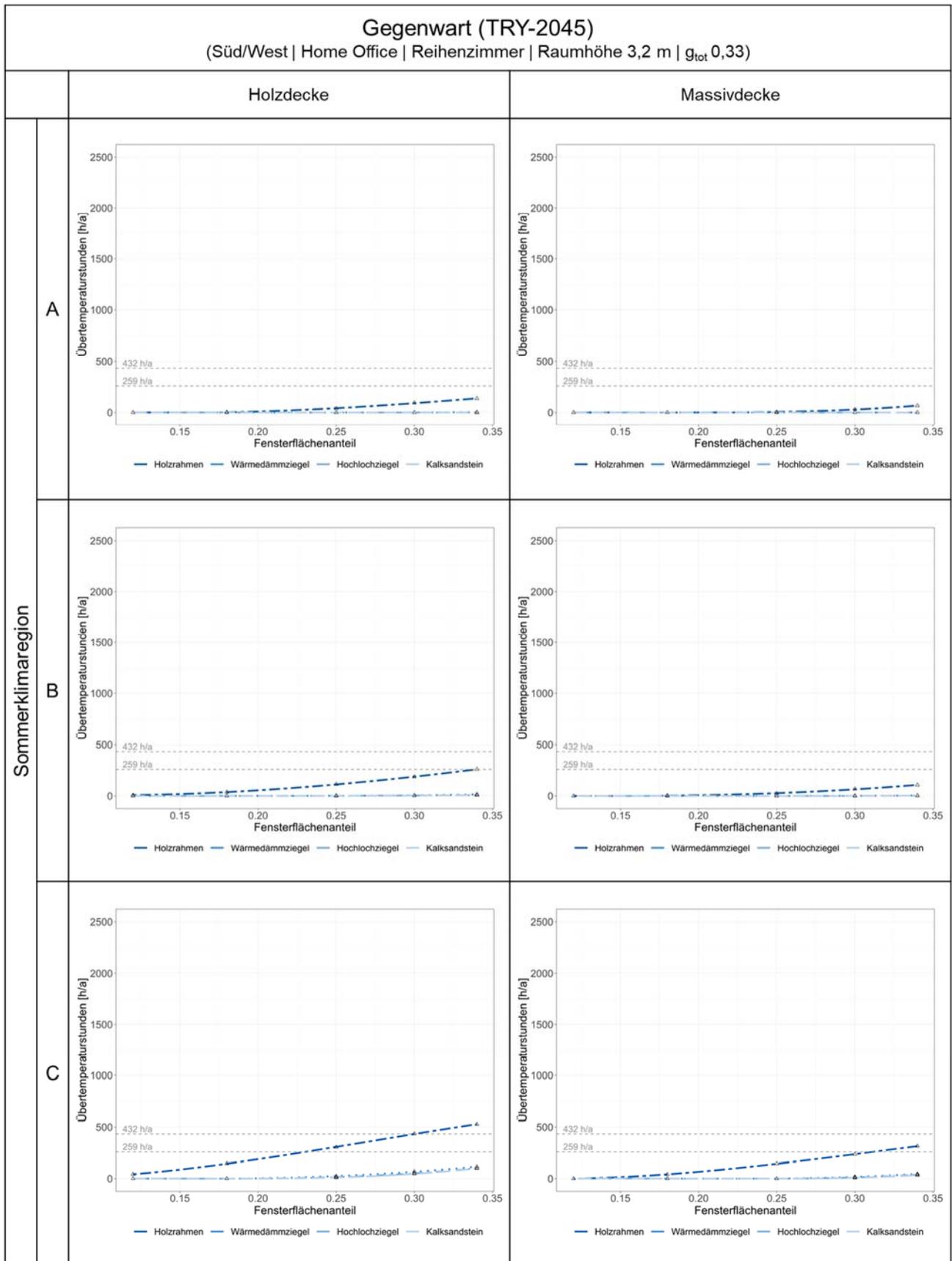


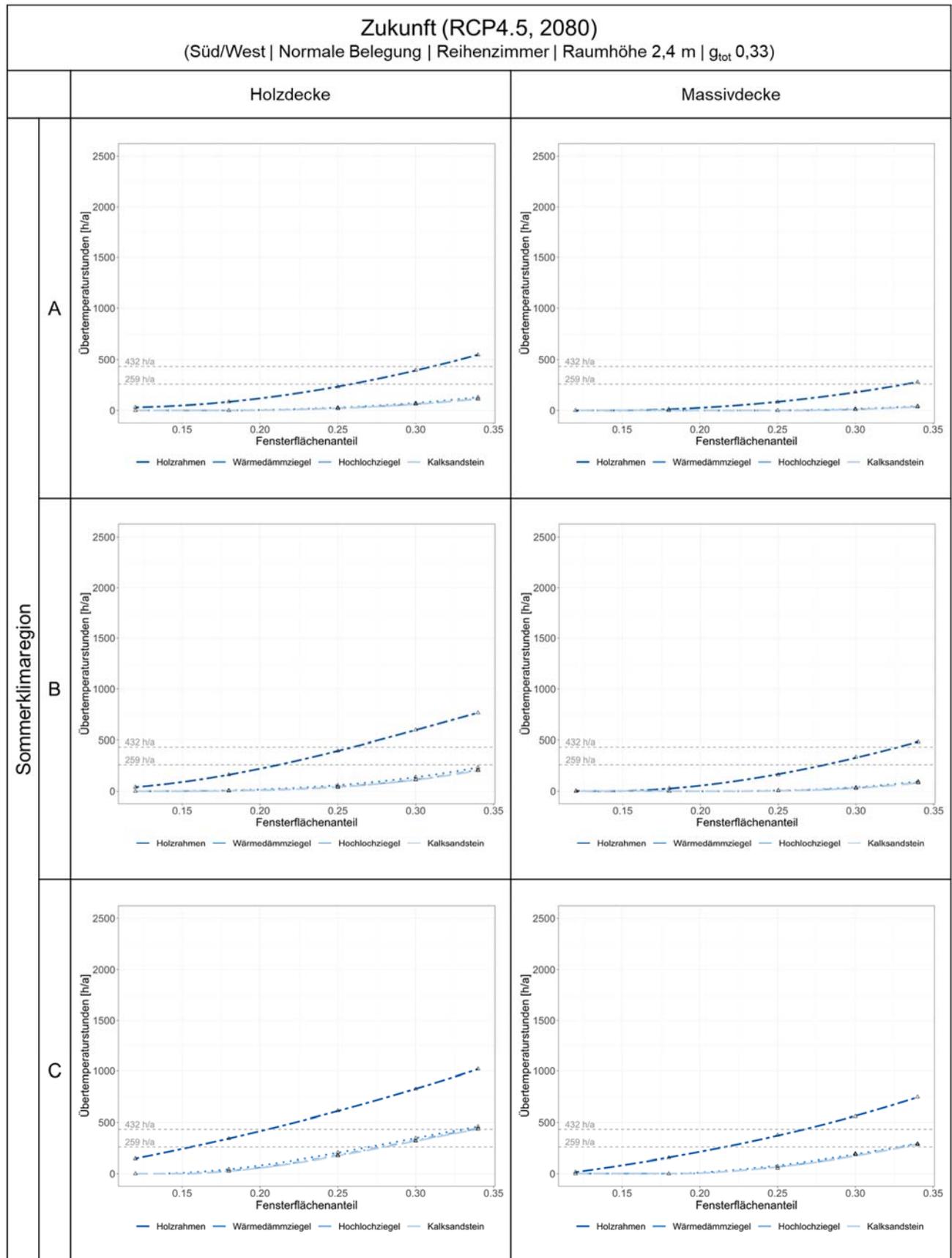


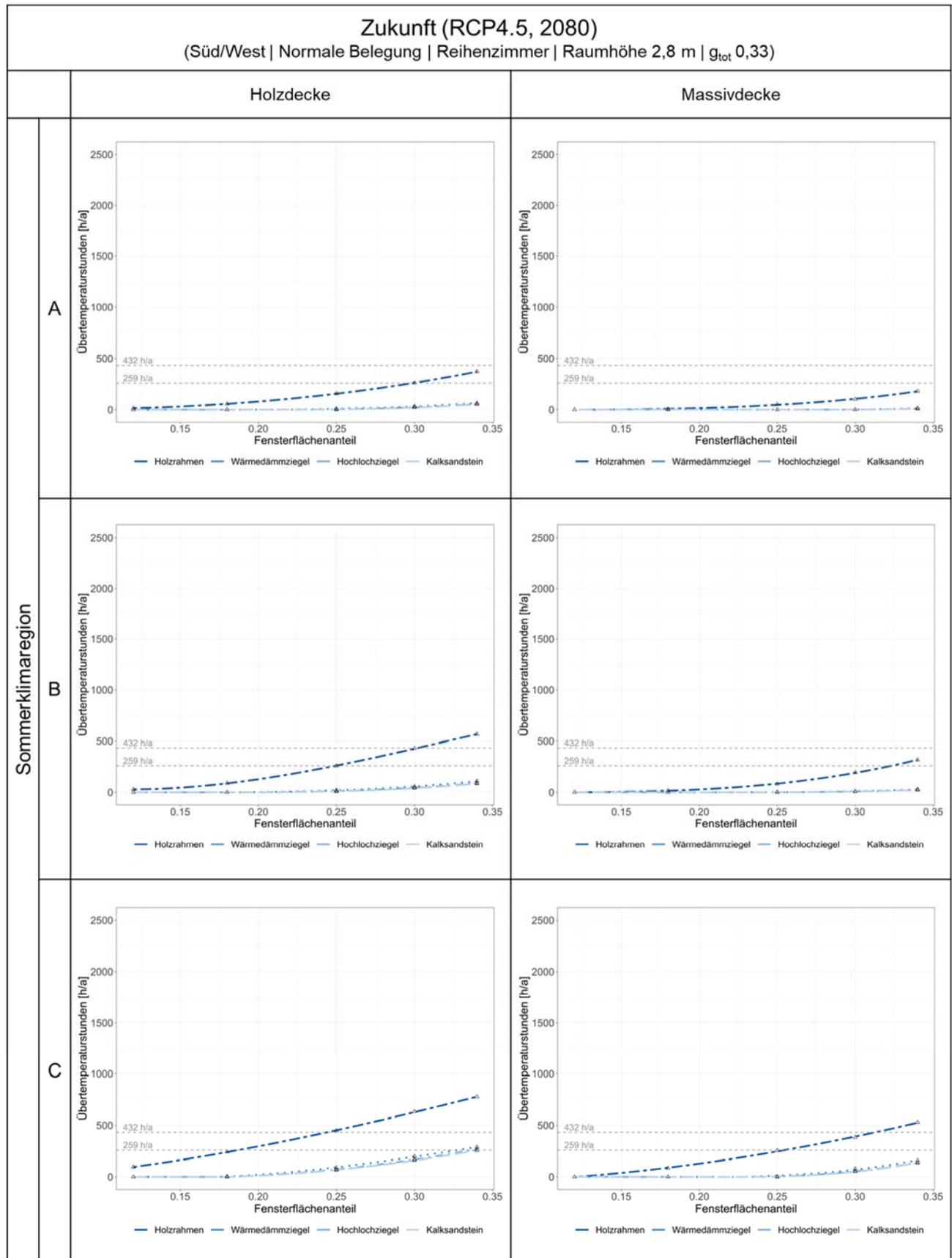


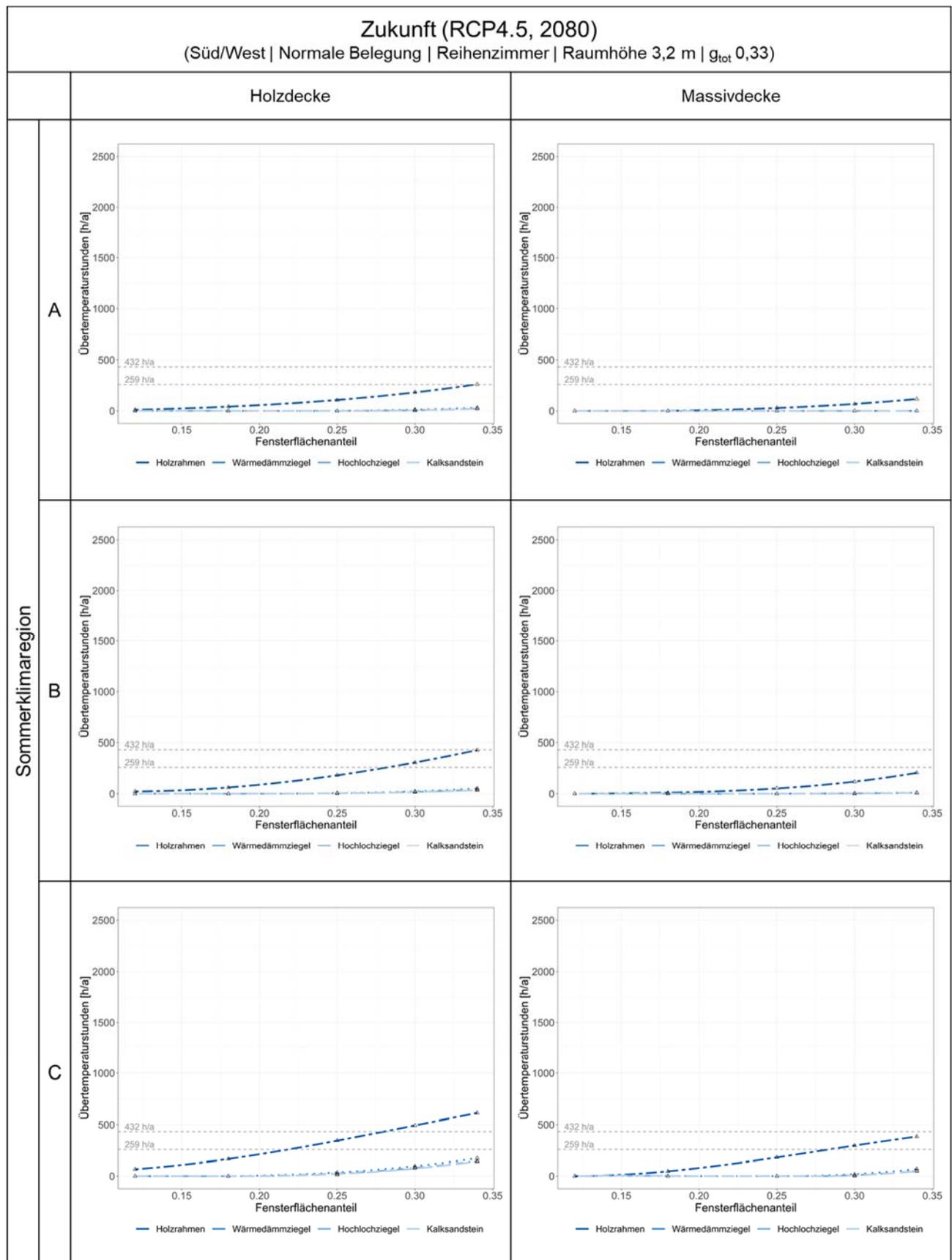


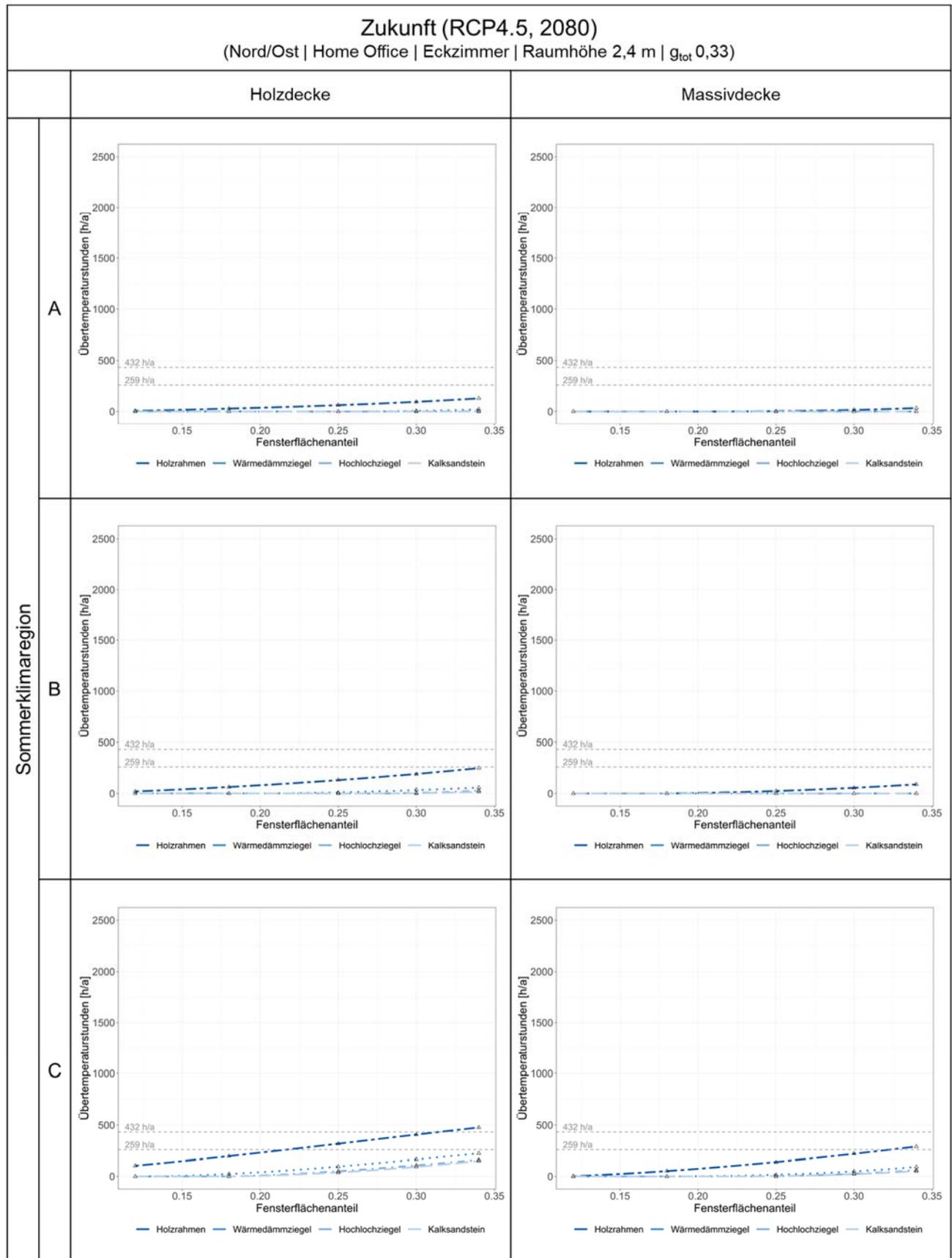


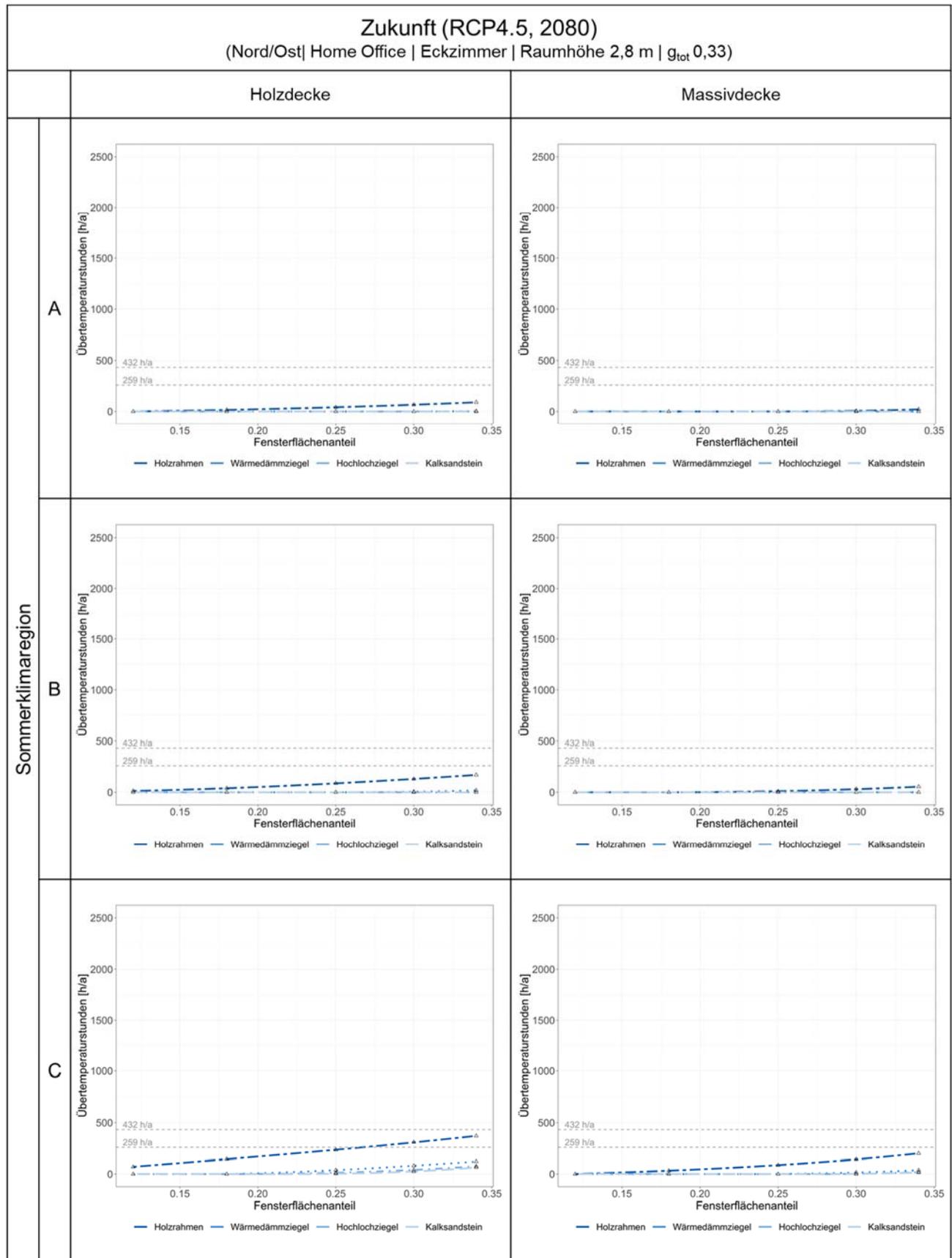


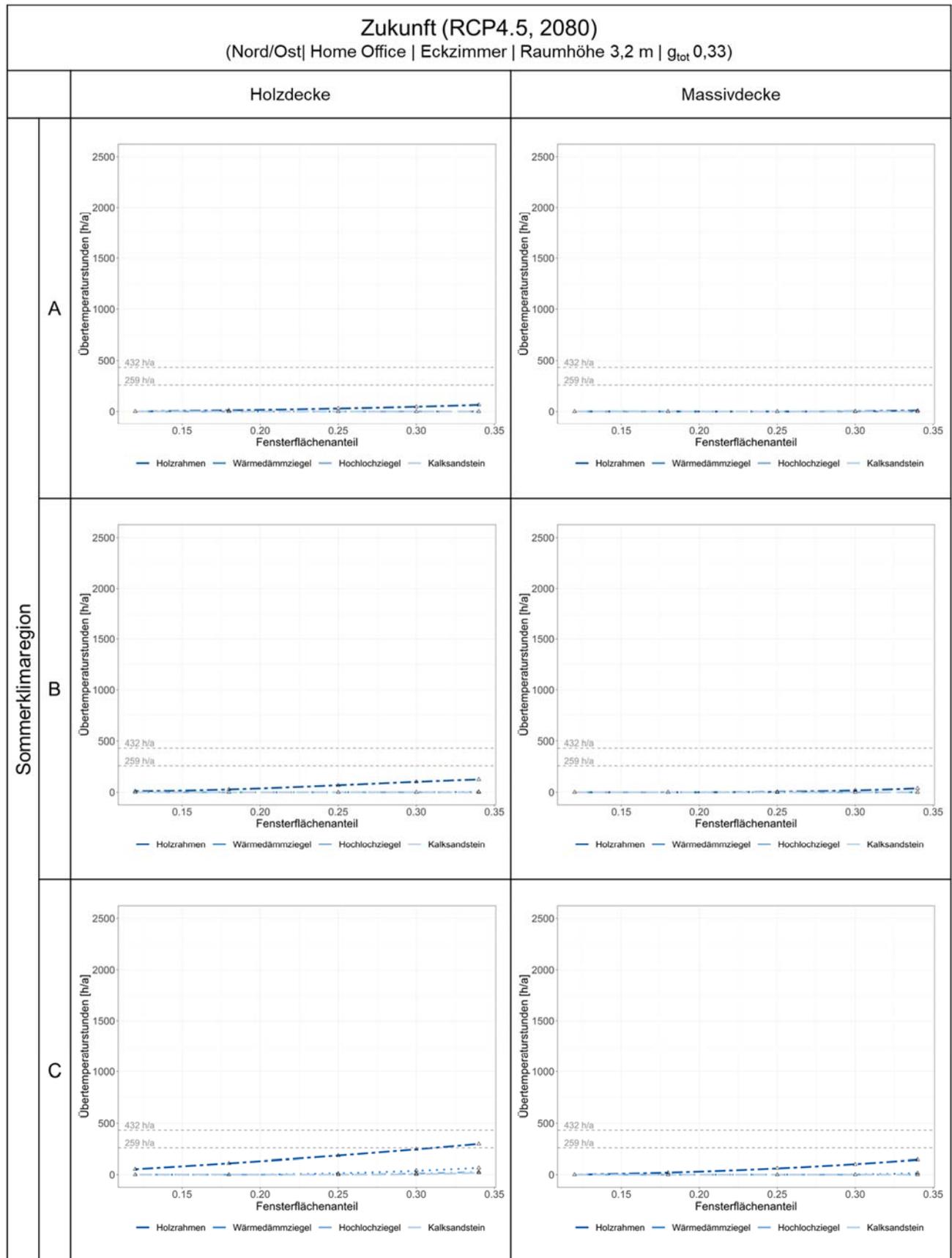


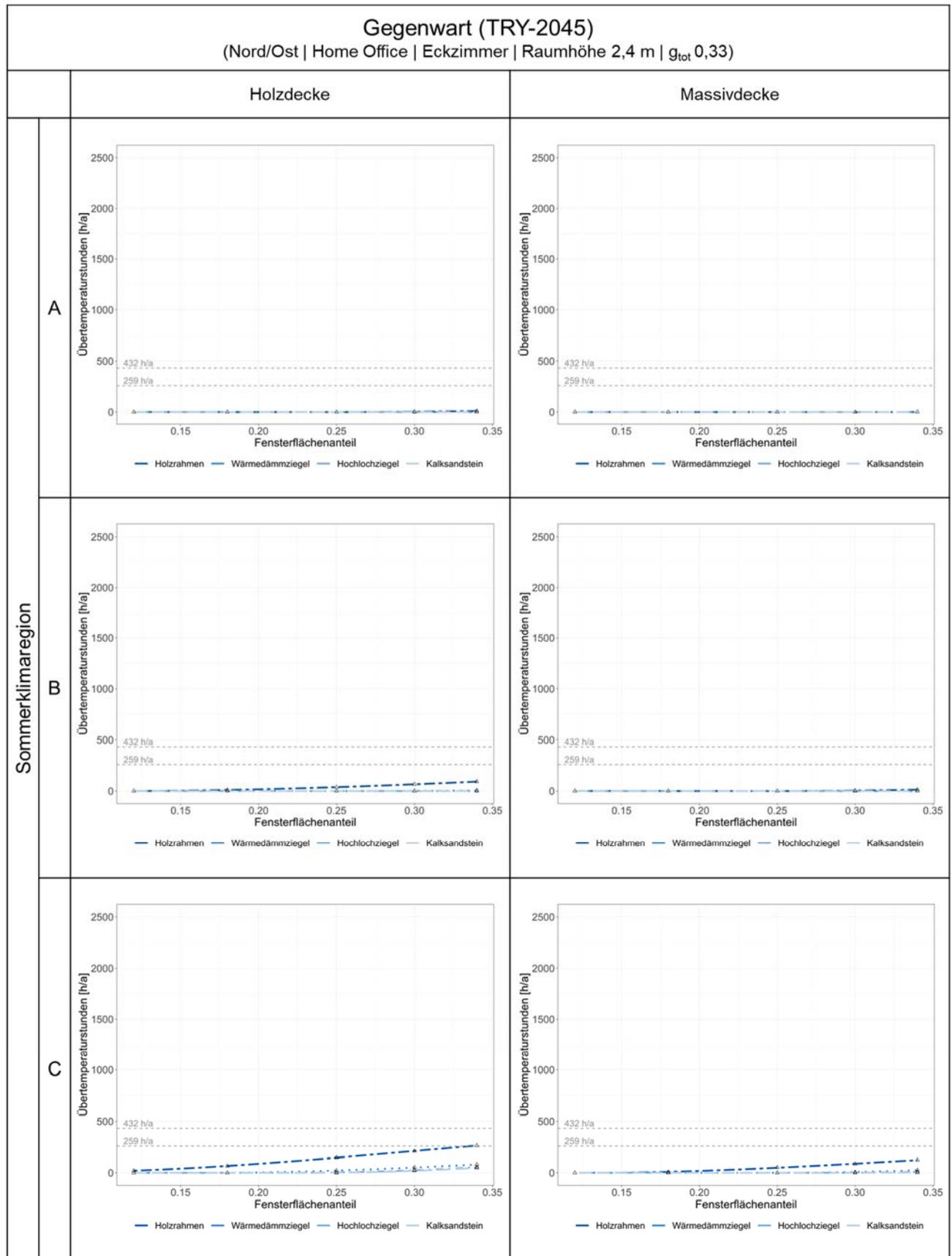


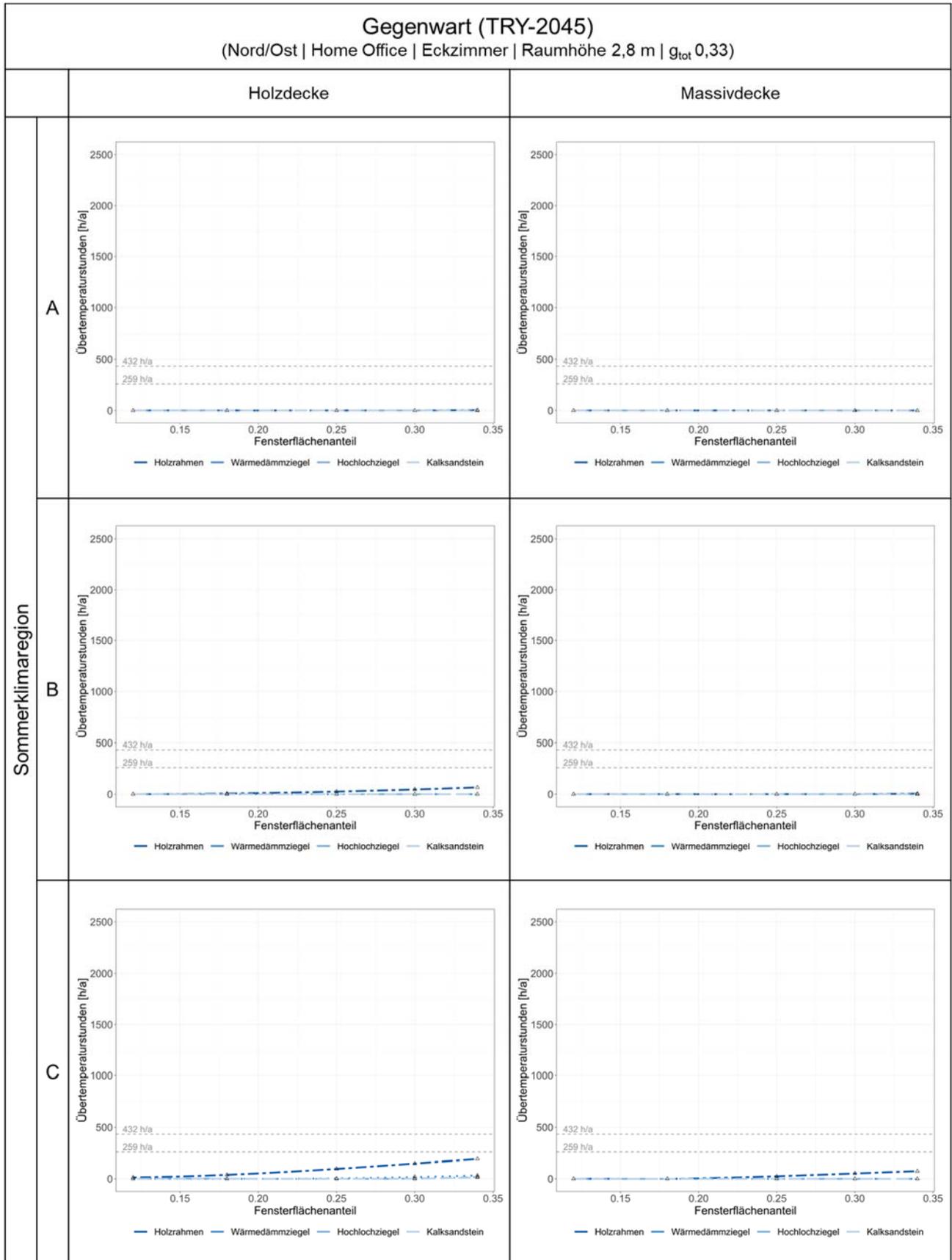


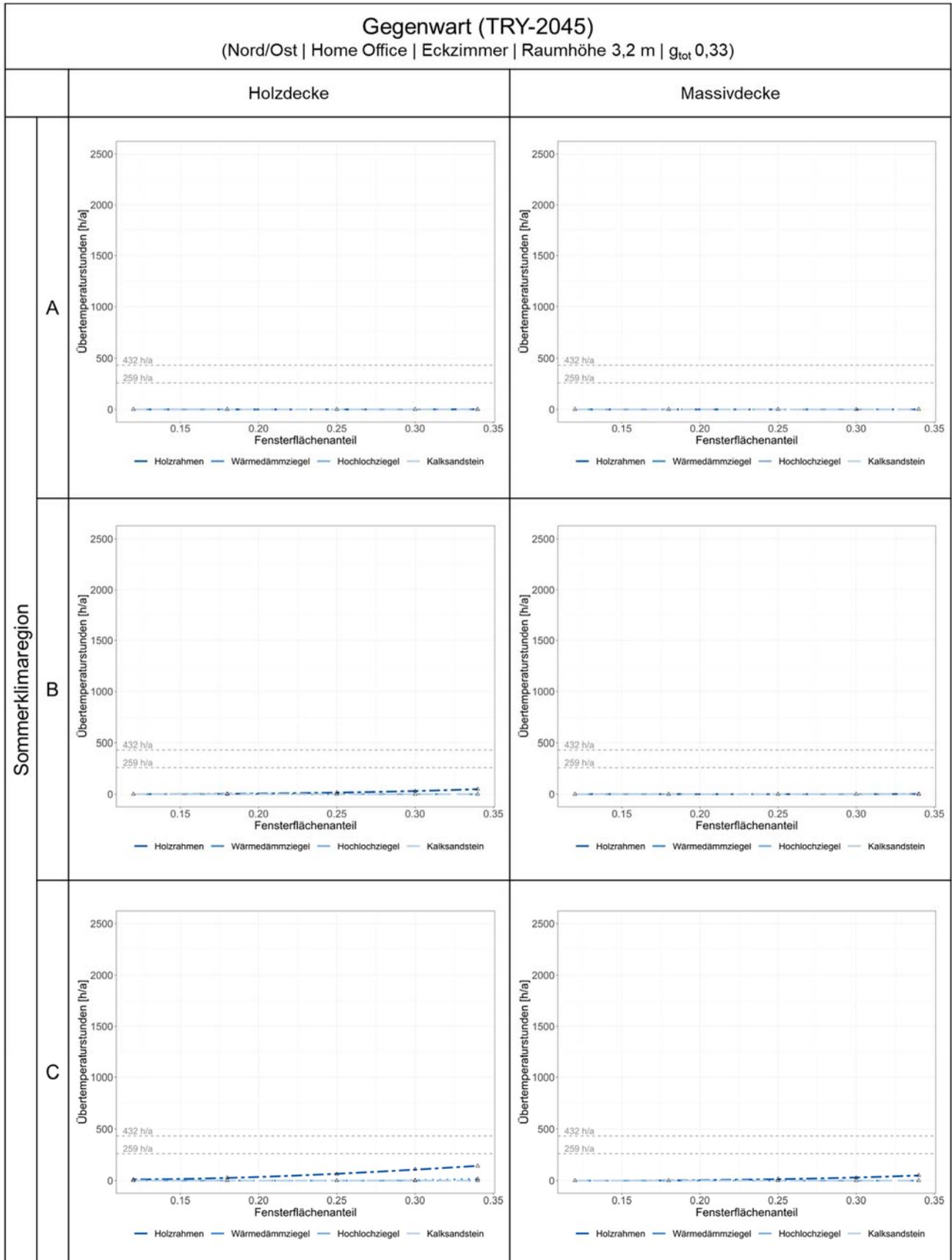


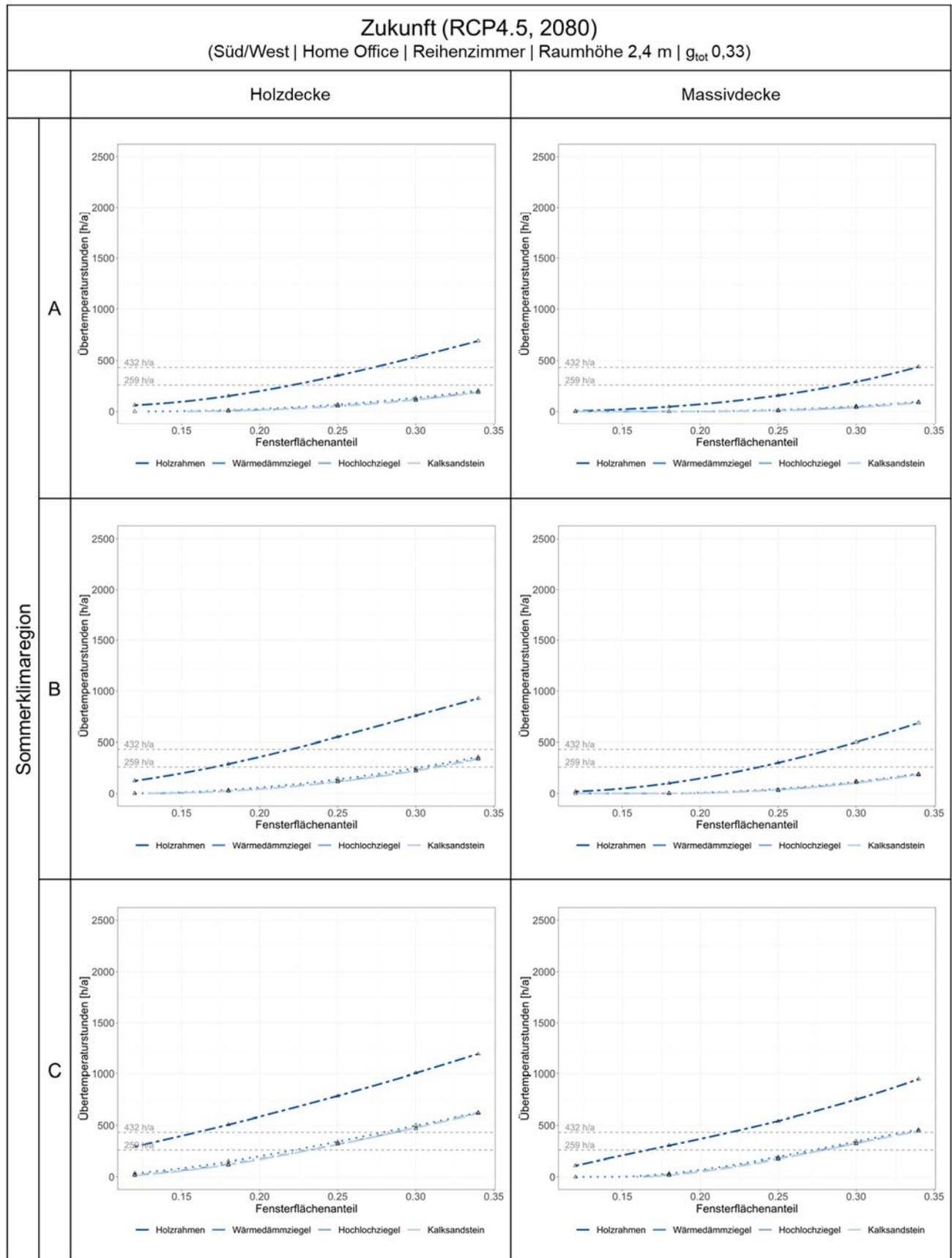


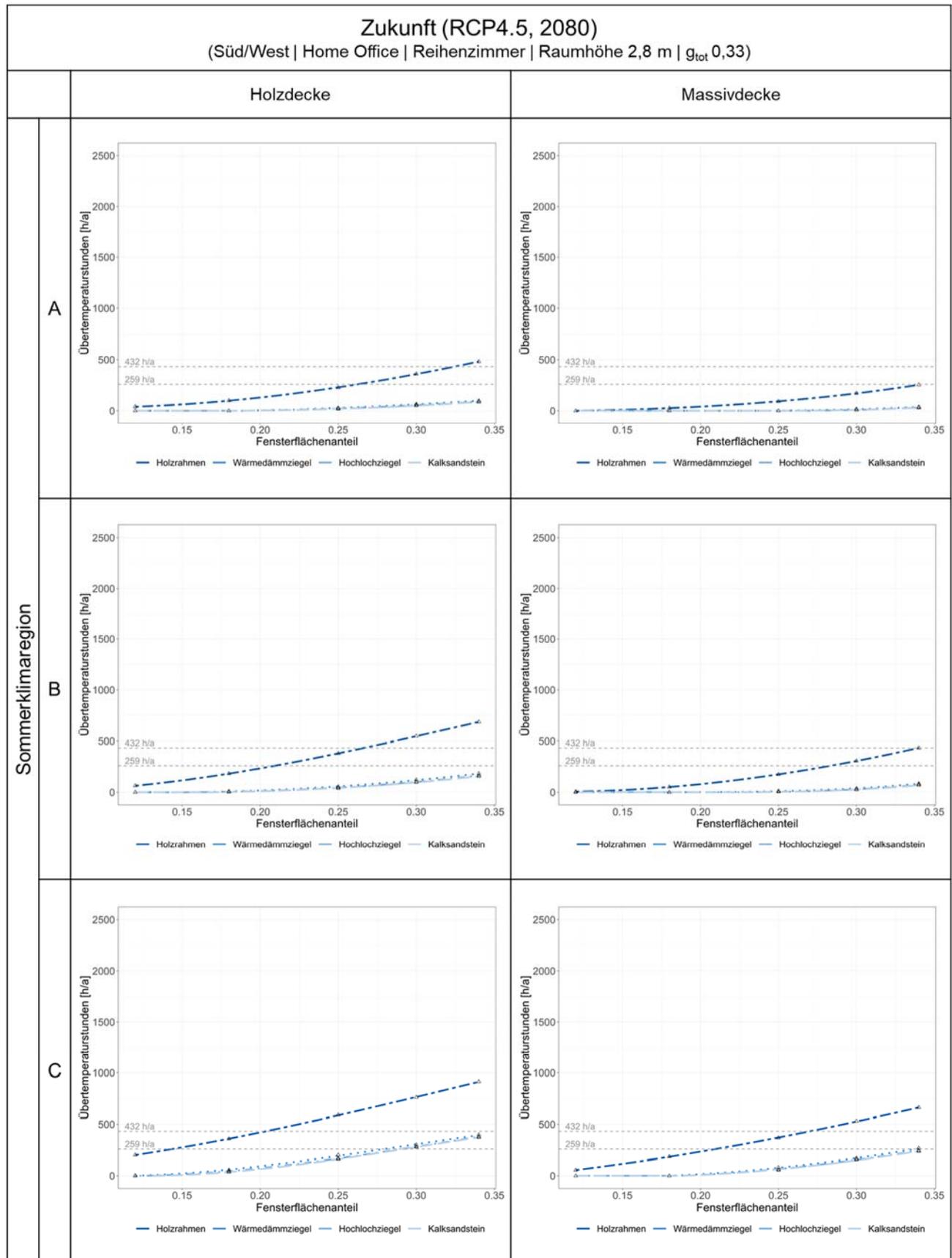


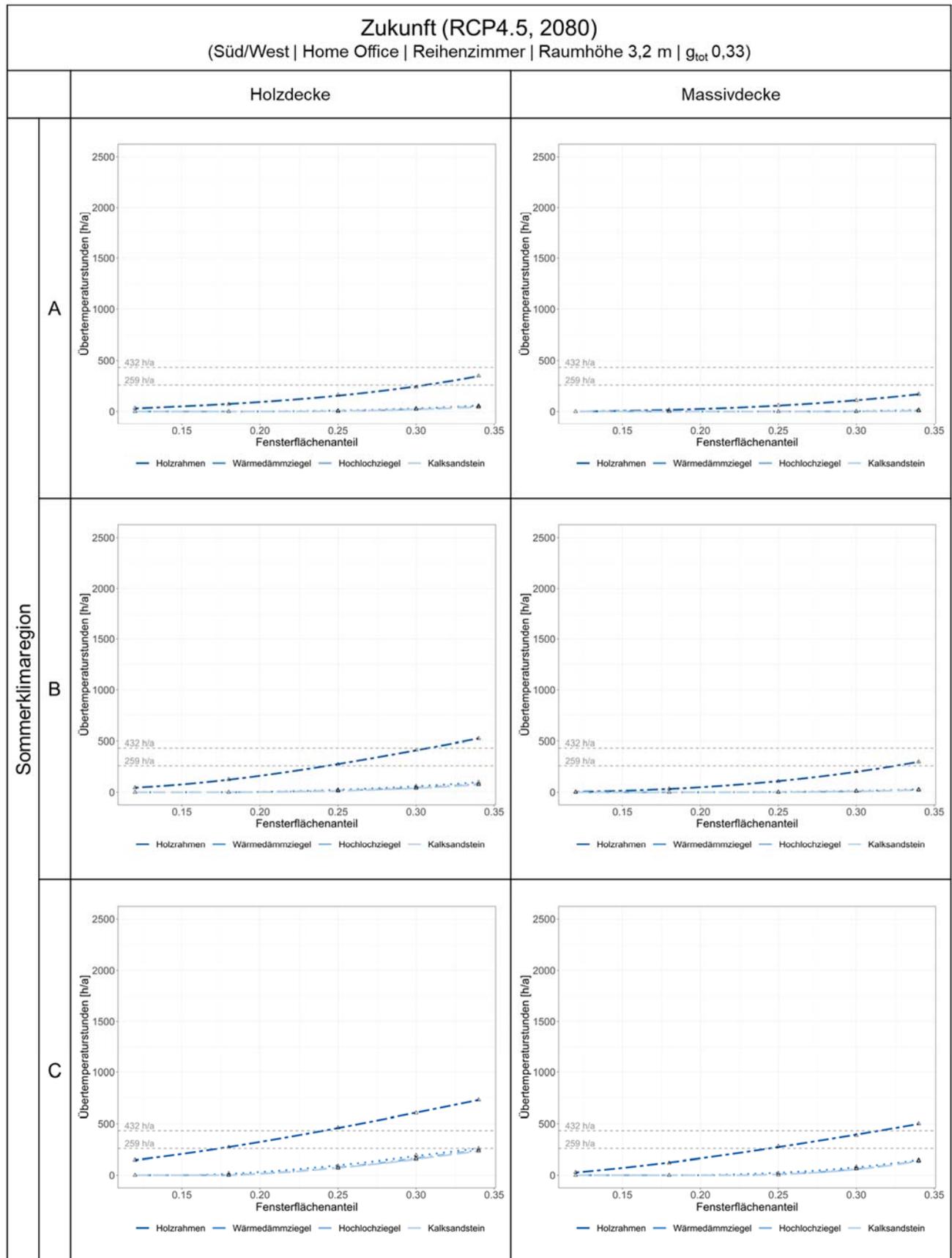


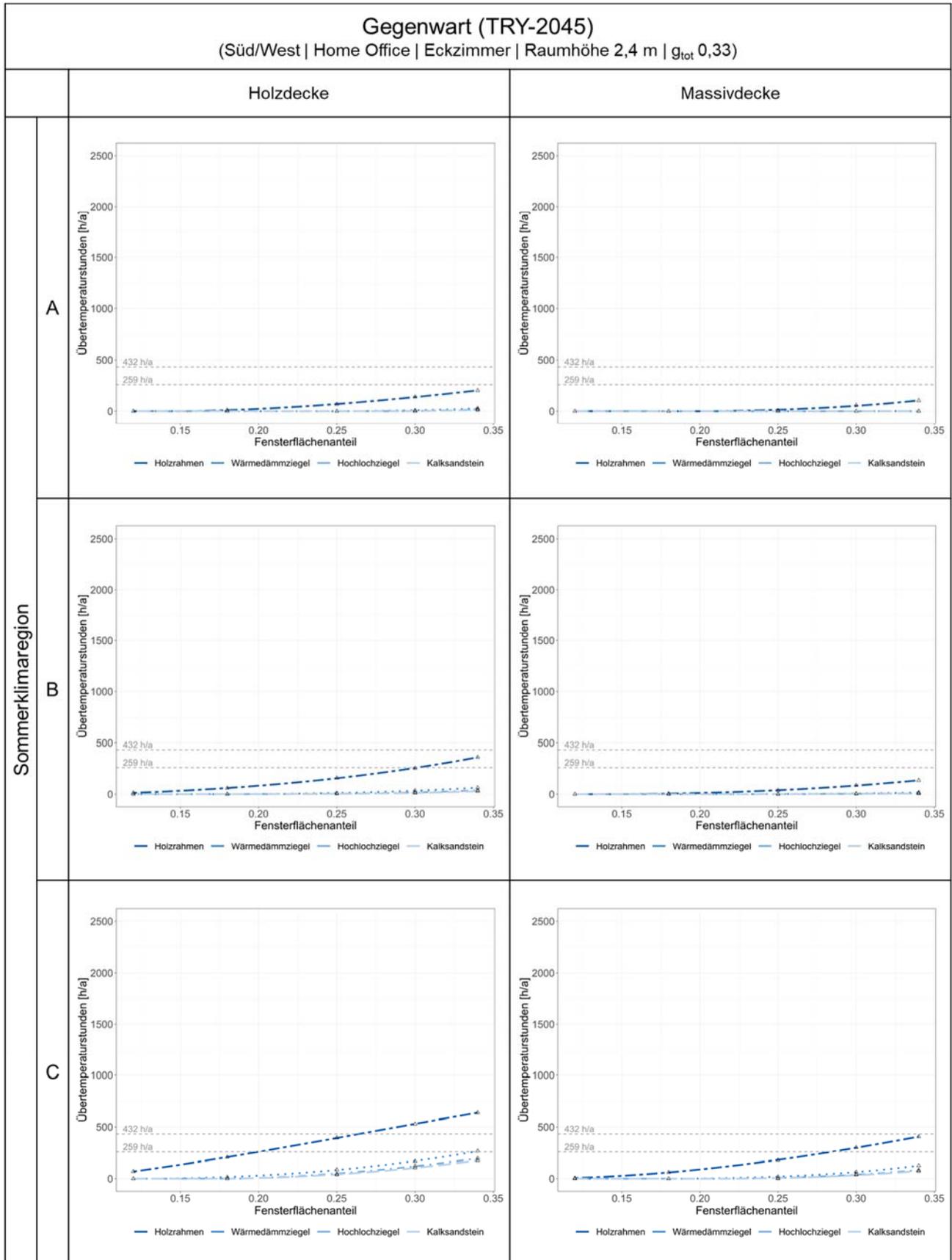


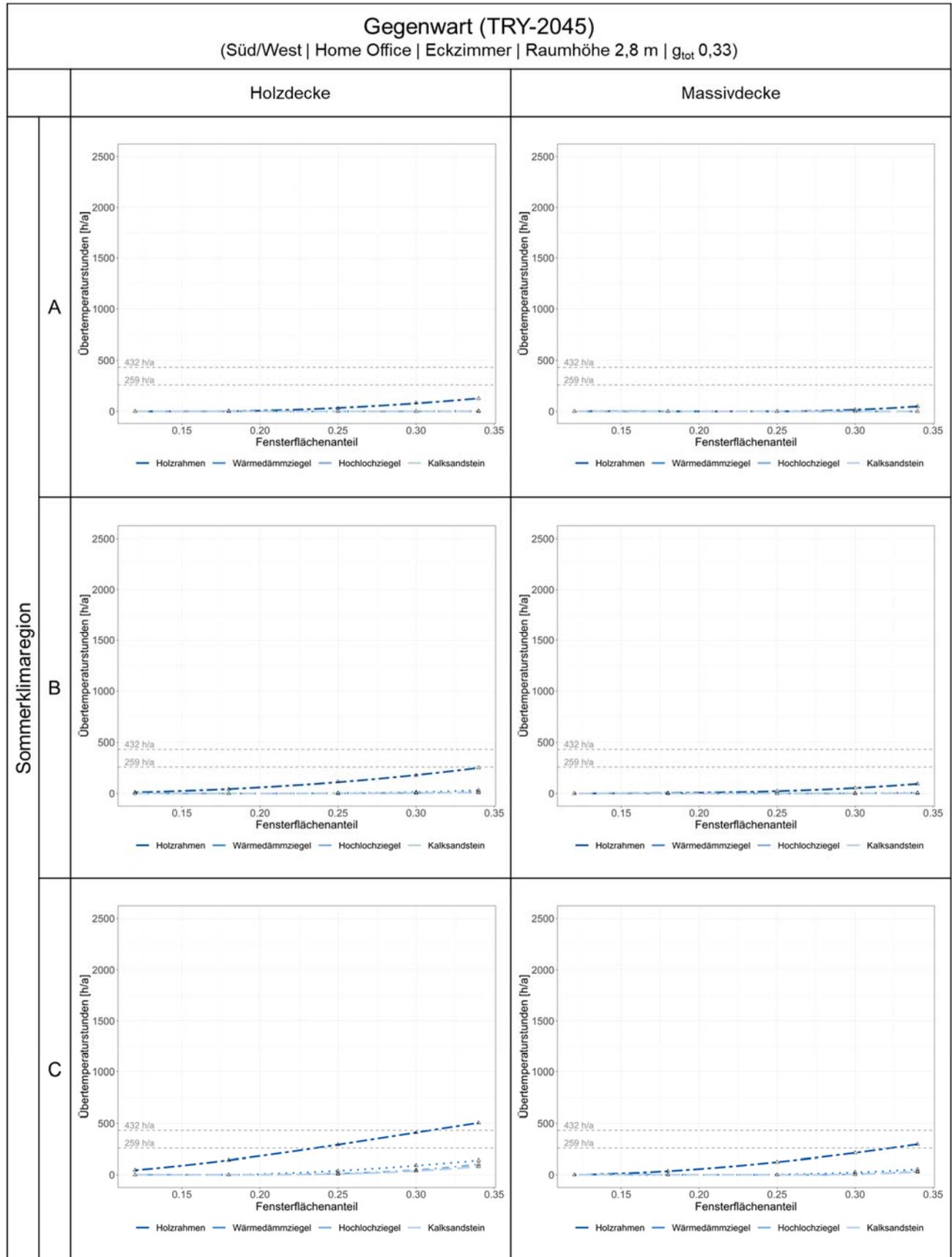


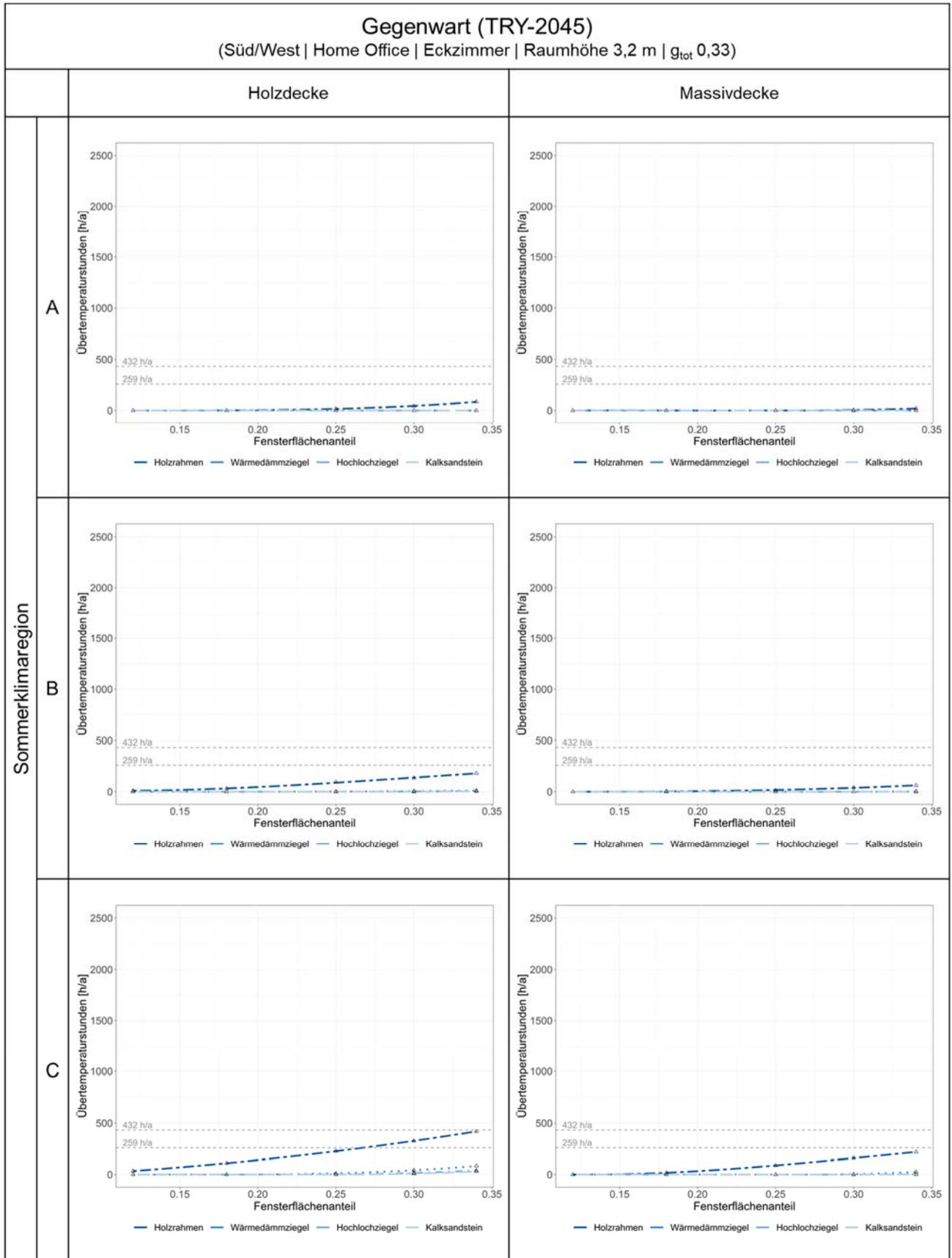


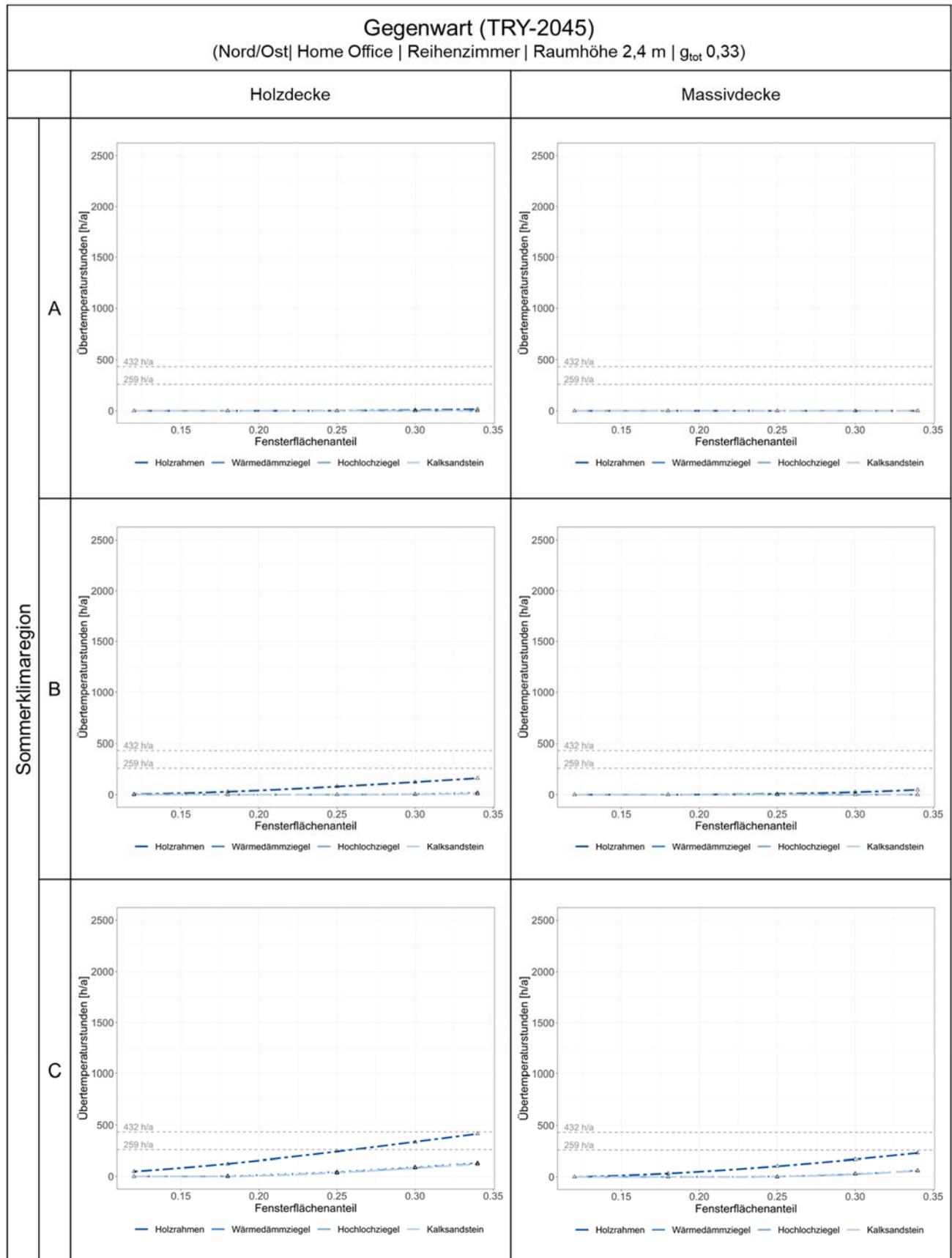


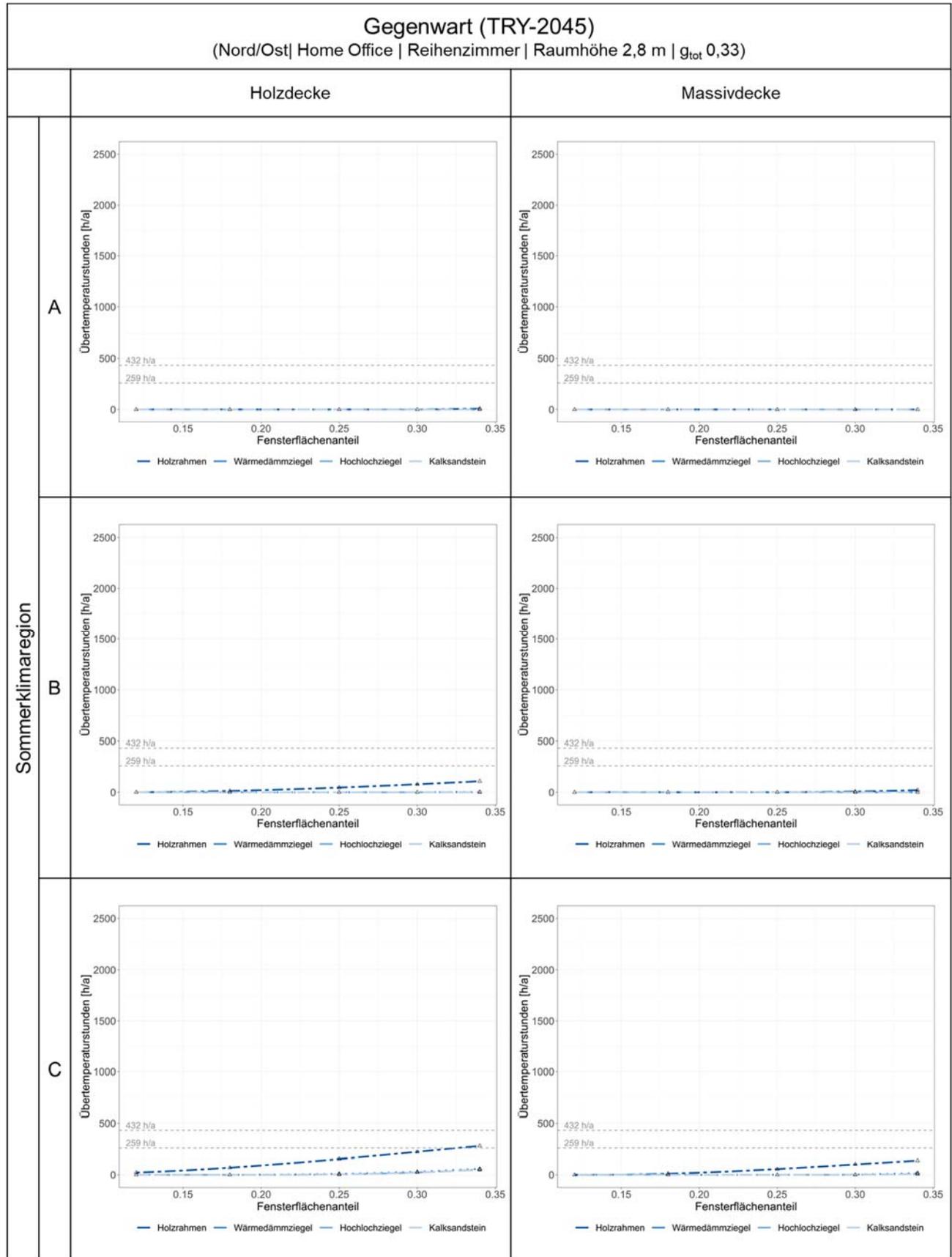


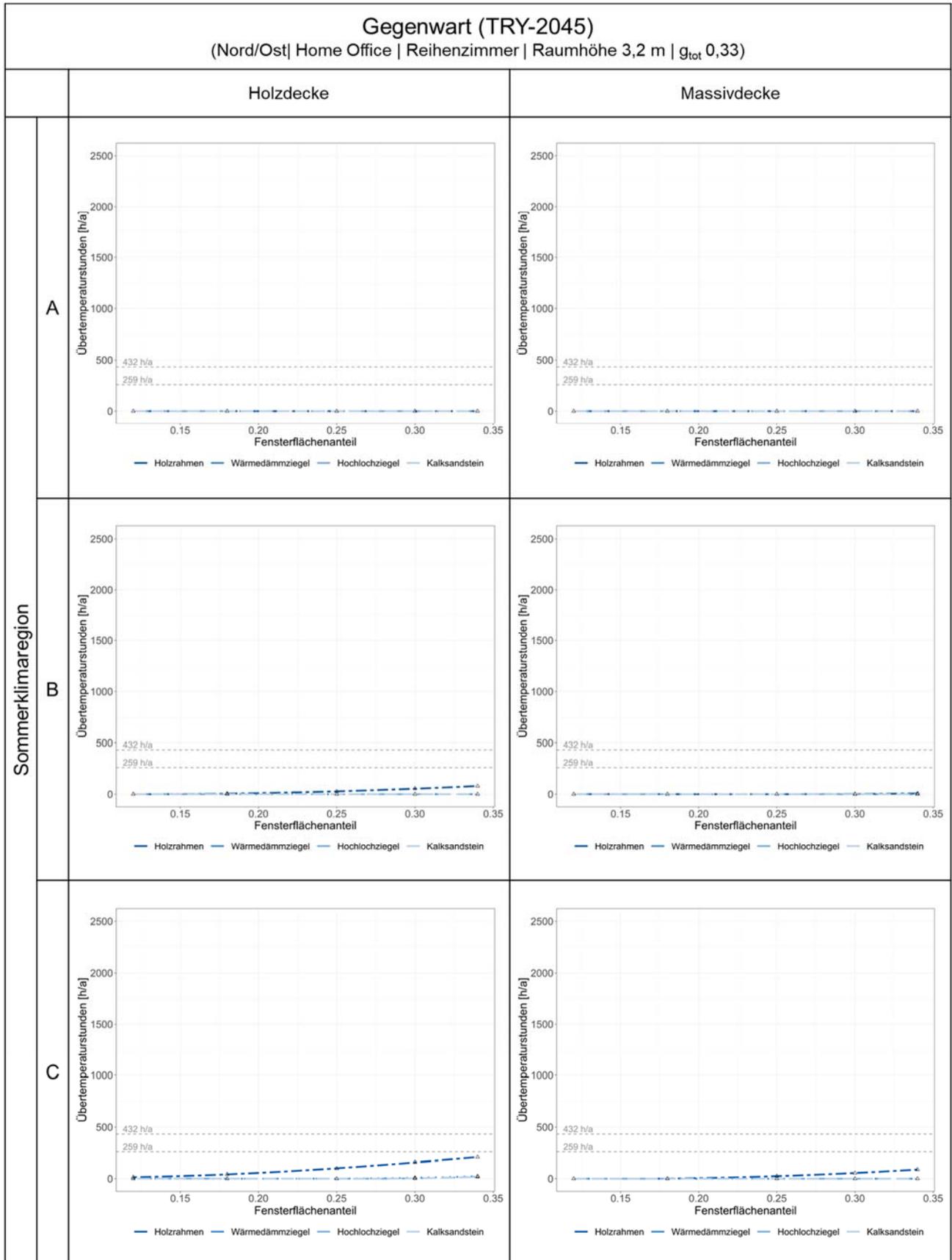












Endbericht für das Forschungsvorhaben:

Zukunft von Bauweisen mit höheren Dichten

Anhang C

